



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## MĚŘENÍ PASIVNÍCH KMITOČTOVÝCH VÝHYBEK PRO REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

MEASUREMENT OF PASSIVE FREQUENCY CROSSOVERS FOR LOUDSPEAKER SYSTEMS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Holínský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Ing. Jan Holínský

**Ročník:** 2

**ID:** 186429

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření pasivních kmitočtových výhybek pro reproduktorové soustavy

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte a teoreticky zpracujte postupy měření jednotlivých charakteristik kmitočtových výhybek pro reproduktorové soustavy. Tuto část zpracujte formou teoretického úvodu laboratorní úlohy, která bude pro jednotlivá měření využívat zvukový analyzátor Audio Precision APx500. Pro laboratorní úlohu připravte sadu přípravků včetně příslušenství, která umožní měření jednotlivých úloh, např. koncový zesilovač, normálovou a zatěžovací impedanci. Tyto komponenty musí mít formu laboratorního přípravku použitelnou ve výuce. Připravte sadu ukázkových měření pro dvoupásmové pasivní kmitočtové výhybky, kterou zpracujete formou praktické části zadání a výstupního protokolu laboratorní úlohy.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy II. [Česko: s.n.], 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.
- [2] COLLOMS, M., DARLINGTON, P. High Performance Loudspeakers. John Wiley & Sons, 2005. ISBN 978--470094-30-3.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 25.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fujcik, Ph.D.**  
předseda rady studijního oddělení

### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **Abstrakt**

Obsahem práce je přiblížit problematiku měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek. Práce popisuje jednotlivé typy měřených charakteristik a jejich možnost měření. Následně řeší návrh modulů pro měření charakteristik pasivních výhybek a to bočník, nominální zátěž a koncový zesilovač. Tyto moduly jsou následně zhotoveny a je ověřena jejich funkce. Pro koncový zesilovač je zde následně proveden i druhý návrh pro splnění vzniklých požadavků v průběhu práce, ale již není zkonstruován. V závěru práce je připravena teoretická část laboratorní úlohy na téma: Měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek, včetně výstupního protokolu.

## **Klíčová slova**

Pasivní kmitočtová výhybka, laboratorní přípravek, kmitočtová charakteristika, impedanční charakteristika, laboratorní úloha

## **Abstract**

The content of the master's thesis is to approach the issue of measuring the characteristics of passive frequency crossover. The work describes individual types of measured characteristics and their possibility of measurement. Then the work describes design of modules for measurement characteristics of passive frequency crossover (shunt, resistive load and amplifier). These modules were made and tested for its functions. For the amplifier is then made a second design for fulfilment requirements. The second version isn't made in this work. At the end of the work was prepared the theoretical part of the laboratory task: Measurement of characteristics of passive frequency crossover, including protocol.

## **Keywords**

Passive frequency crossover, laboratory device, frequency characteristic, impedance characteristic, laboratory task

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLÍNSKÝ, Jan. *Měření pasivních kmitočtových výhybek pro reproduktorové soustavy*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134645>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Miroslav Balík.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření pasivních kmitočtových výhybek pro reproduktorové soustavy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svému otci Pavlu Holínskému za podporu při studiu na VUT v Brně.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

Obsah.....	vii
Seznam obrázků .....	viii
Seznam tabulek .....	ix
Úvod .....	1
1. Kmitočtové filtry a korekční obvody .....	2
1.1 Charakteristiky kmitočtových výhybek.....	3
1.1.1 Kmitočtová charakteristika.....	4
1.1.2 Kmitočtová závislost impedance.....	5
2. Způsob měření pasivních kmitočtových výhybek.....	9
2.1 Měření naprázdno .....	9
2.2 Měření s reálnou zátěží.....	10
2.3 Měření s reproduktorem .....	11
3. Návrh přípravků pro měření.....	12
3.1 Požadavky na koncový zesilovač .....	12
3.1.1 Návrh obvodu koncového zesilovače.....	12
3.1.2 Návrh podoby koncového zesilovače.....	16
3.1.3 Návrh druhé verze koncového zesilovače.....	18
3.1.4 Návrh podoby druhé verze koncového zesilovače .....	25
3.2 Požadavky na moduly zátěží .....	27
3.2.1 Návrh modulu s normálovou impedancí .....	27
3.2.2 Návrh modulu se zatěžovací impedancí.....	29
4. Měření charakteristik pomocí APx500.....	31
4.1 Program APx500 .....	31
4.2 Měření kmitočtové charakteristiky v programu APx500 .....	31
4.3 Měření kmitočtové závislosti impedance v programu APx500.....	32
5. Realizace přípravku.....	34
5.1 Návrh DPS.....	34
5.1.1 První verze koncového zesilovače .....	34
5.1.2 Druhá verze koncového zesilovače .....	34
5.2 Sestavení částí přípravku .....	35
5.2.1 Sestavení první verze koncového zesilovače .....	35
5.2.2 Sestavení druhé verze koncového zesilovače.....	35
5.2.3 Sestavení modulů zátěží .....	37
6. Měření a optimalizace .....	40
6.1 Měření první verze koncového zesilovače .....	40
6.2 Měření modulů zátěží .....	41
7. Příprava teoretické části laboratorní úlohy.....	42
7.1 Požadavky na laboratorní úlohy .....	42
Závěr.....	44
Literatura .....	46
Seznam symbolů, veličin a zkratk .....	48
Seznam příloh.....	49

# Seznam obrázků

Obrázek 1. Řazení výhybek v elektroakustickém řetězci podle způsobu provedení .....	2
Obrázek 2. Zjednodušené blokové schéma dvoupásmové kmitočtové výhybky .....	4
Obrázek 3. Příklad amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky .....	4
Obrázek 4. Příklad modulové a fázové kmitočtové charakteristiky .....	5
Obrázek 5. Hodograf - Ideální impedance reproduktoru bez akustické zátěže .....	6
Obrázek 6. Příklad kmitočtových charakteristik impedance .....	6
Obrázek 7. Příklad kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru .....	7
Obrázek 8. Příklad kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru s ideální kompenzací impedance .....	7
Obrázek 9. Příklad kmitočtové závislosti impedance vysokotónového reproduktoru bez kompenzace (vpravo) a s ideální kompenzací impedance (vlevo) .....	8
Obrázek 10. Zapojení elektroakustického řetězce .....	9
Obrázek 11. Zapojení elektroakustického řetězce pro měření naprázdno .....	9
Obrázek 12. Zapojení elektroakustického řetězce pro měření s reálnou impedancí .....	10
Obrázek 13. Zapojení elektroakustického řetězce pro měření s reproduktorem .....	11
Obrázek 14. Schéma zapojení dvojitého koncového zesilovače s LM4780 .....	13
Obrázek 15. Blokové schéma zapojení dvojitého koncového zesilovače .....	14
Obrázek 16. Principiální zapojení relé .....	16
Obrázek 17. Rozložení prvků modulu koncového zesilovače .....	17
Obrázek 18. Ideové zapojení koncového zesilovače s LM3886 .....	18
Obrázek 19. Blokové schéma zapojení druhé verze dvojitého koncového zesilovače .....	19
Obrázek 20. Zapojení komparátoru pro ovládání stavu Mute koncového zesilovače .....	20
Obrázek 21. Zdroj pro komparátor -5 V .....	20
Obrázek 22. Principiální zapojení relé .....	22
Obrázek 23. Obvod pro změnu vstupní citlivosti - aktivní řešení (vlevo), pasivní řešení (vpravo) .....	22
Obrázek 24. Zapojení obvodu THAT1200 .....	23
Obrázek 25. Zdroj pro obvod THAT1200 $\pm 15$ V .....	24
Obrázek 26. Uspořádání konektorů na zadním panelu .....	25
Obrázek 27. Návrh krycí desky přípravku .....	26
Obrázek 28. Rozložení prvků modulu druhé verze koncového zesilovače .....	26
Obrázek 29. Náhradní tepelné schéma pro bočník .....	27
Obrázek 30. Rozložení prvků modulu bočníku .....	28
Obrázek 31. Náhradní tepelné schéma pro zátěž .....	29
Obrázek 32. Rozložení prvků modulu zátěží .....	30
Obrázek 33. Podoba vybrané přístrojové skříně pro koncový zesilovač .....	37
Obrázek 34. Vzhled vnitřního zapojení bočníku .....	38
Obrázek 35. Vzhled vnitřního zapojení zátěže .....	39
Obrázek 36. modulová kmitočtová charakteristika první verze koncového zesilovače .....	40
Obrázek 37. Kmitočtová závislost impedance modulu zátěže .....	41

# Seznam tabulek

Tabulka 1. Typy a hodnoty součástek dvojitého koncového zesilovače.....	15
Tabulka 2. Typy a hodnoty součástek koncového zesilovače s obvodem LM3886 .....	21
Tabulka 3. Změřené hodnoty SNR variant změny vstupní citlivosti .....	23
Tabulka 4. Vypočtené hodnoty odporů v odporovém děliči pro nastavení vstupní citlivosti..	24
Tabulka 5. Soupis kabeláže k propojení všech částí první verze koncového zesilovače .....	35
Tabulka 6. Soupis kabelů k propojení všech částí druhé verze koncového zesilovače.....	36
Tabulka 7. Soupis kabeláže k propojení všech částí bočníku .....	38
Tabulka 8. Soupis kabeláže k propojení všech částí zátěže .....	38



# Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek. Prvním cílem práce je nastudovat a sepsat problematiku měření jednotlivých charakteristik kmitočtových výhybek pro reproduktorové soustavy.

Dále je v této práci proveden návrh potřebných obvodů pro měření, které jsou navrženy jako samostatné moduly pro flexibilitu jejich použití. Byl proveden návrh DPS koncového zesilovače a také byly navrženy konstrukční řešení všech navrhovaných modulů: koncového zesilovače, bočníku a zatěžovací impedance.

Pro modul koncového zesilovače byla vyrobena a osazena základní deska, která na sobě nenese pouze obvod koncového zesilovače, ale také obvody pomocné, které zajišťují správnou funkci a dovolují univerzálnější použití koncového zesilovače.

Následně byla provedena realizace navržených modulů. Jejich funkce byla ověřena pomocí přípravku APX, pomocí kterého byly změřeny základní charakteristiky všech modulů. Pro splnění rozmezí požadovaných hodnot byla provedena optimalizace.

Při realizaci koncového zesilovače s obvodem LM4780 bylo zjištěno, že tento obvod se již nevyrábí a nelze již zakoupit v běžné distribuční síti. Díky tomu a v souvislosti s novými požadavky na koncový zesilovač (volba vstupní citlivosti, možnost změny zesílení koncového zesilovače, možnost otočení fáze) byl pro následnou možnou úpravu při používání proveden nový návrh s následným ověřením funkce navrhovaných obvodů na nepájivém poli.

V rámci diplomové práce byla připravena teoretická část laboratorní úlohy, která se bude zabývat tématem měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek. Zde byly popsány základní vlastnosti měřených charakteristik a také základní principy jejich měření. Pro laboratorní úlohu byl připraven výstupní protokol v excelu, do kterého studenti budou importovat naměřená data.

# 1. Kmitočtové filtry a korekční obvody

Reproduktorové soustavy neobsahují pouze kmitočtové výhybky, ale také různé kompenzační obvody jako jsou například kompenzace geometrie reproduktorové ozvučnice, sfázování vysokotónového a hlubokotónového reproduktoru, nebo kompenzace parametrů reproduktoru. Počet pasivních prvků, použitý na kompenzační obvody, je mnohem vyšší než na samotné kmitočtové výhybky. V práci je dále používán pojem výhybka jako souhrn všech filtračních a kompenzačních obvodů.

Kmitočtová výhybka je nedílnou a jednou z hlavních součástí reproduktorové soustavy. Zvukové kmitočtové pásmo v dnešní době nelze reprodukovat jedním reproduktorem tak, aby nedocházelo k jeho zkreslení. Proto je pomocí kmitočtové výhybky rozděleno do takzvaných subpásem, aby každý reproduktor reproduktorové soustavy reprodukoval pouze kmitočty v rozsahu, pro které je určen, a nebyl zatěžován kmitočty, které není schopen reprodukovat a tím nedošlo k jeho poškození. Pro rozdělení kmitočtového pásma mezi hlubokotónový a vysokotónový reproduktor jsou používány kmitočtové filtry typu horní a dolní propust. Pokud reproduktorová soustava obsahuje středotónový reproduktor, přidává se další filtr, a to typu pásmová propust. Jednotlivá subpásma, vytvořena takovou sadou filtrů, jsou vymezeny pomocí takzvaných mezních kmitočtů.

Výhybky lze podle realizace rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní výhybky obsahují pasivní a aktivní prvky. V elektroakustickém řetězci jsou řazeny před koncovým zesilovačem. Pasivní výhybky však obsahují pouze prvky pasivní a jsou řazeny až ve výkonové části elektroakustického řetězce. Blokové uspořádání elektroakustických řetězců, s jednotlivými typy výhybek jsou uvedeny na obrázku 1 [1].



Obrázek 1. Řazení výhybek v elektroakustickém řetězci podle způsobu provedení

Z umístění jednotlivých typů výhybek v řetězci zpracovávající vstupní signál je vidět, že napěťové úrovně u aktivních výhybek jsou nižší než u výhybek pasivních. Díky tomu se u pasivních výhybek více projevují parazitní vlastnosti součástí a dosažení přesných parametrů výhybek při realizaci je složitější oproti aktivním výhybkám. Aktivní výhybky naopak obsahují oproti pasivním výhybkám větší množství součástí, potřebují napájení aktivních prvků a každý kanál má vlastní koncový zesilovač [1].

## 1.1 Charakteristiky kmitočtových výhybek

Každý obvod v kmitočtové výhybce má určitou funkci a působí na průchozí signál. Základními obvody kmitočtových výhybek jsou filtry typu horní a dolní propust (pásmová propust). Kmitočtové filtry slouží k rozdělení vstupního signálu na určitý počet subpásem podle použité reproduktorové soustavy.

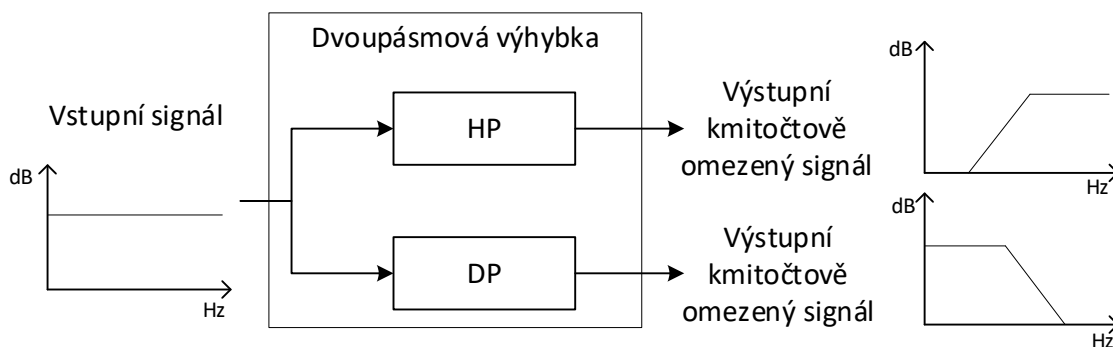
Kompenzace citlivosti je používána pro korekci různých citlivostí použitých reproduktorů, kdy by po přivedení stejné úrovně signálu vyzařoval každý reproduktor soustavy jinou energii. Tato kompenzace se většinou používá v signálové cestě vysokotónového reproduktoru, protože mívá větší citlivost, a hlavně zapojením korekčních obvodů do cesty signálu dojde ke zvýšení činitele jakosti a ke zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky v okolí rezonančního kmitočtu. Vysokotónový reproduktor má rezonanční kmitočet položen níže, než je mezní kmitočet filtru horní propusti řazeného v signálové cestě pro vysokotónový reproduktor, a tak nemá téměř žádný vliv na reprodukováný signál. U hlubokotónového reproduktoru by docházelo k degradaci signálu v okolí rezonančního kmitočtu.

Kompenzace fáze je provedena pomocí fázovacího článku, který má lineární modulovou kmitočtovou charakteristiku s přenosem jedna. Fázovací článek kompenzuje zpoždění signálu, které vzniká v reproduktorových soustavách volbou filtrů, velikostí reproduktorů, rozložením reproduktorů v ozvučnici a samozřejmě i pozicí posluchače k reproduktorové soustavě. U dvoupásmových reproduktorových soustav se pro kompenzaci zpoždění signálu přidává zpoždění do signálové cesty vysokotónového reproduktoru. Vysokotónový reproduktor je totiž většinou v ozvučnici umístěn před hlubokotónovým reproduktorem (blíže k posluchači) - akustický střed hlubokotónového reproduktoru je dále za hranou ozvučnice.

Baffle step korekce je korekce kmitočtů, které mají velmi dlouhou vlnovou délku k porovnání s rozměry ozvučnice, v níž je umístěn reproduktor, který je reprodukuje. Tyto kmitočty jsou vyzařovány všesměrově. Kratší vlnové délky vyzařuje reproduktor umístěný v ozvučnici do frontálního poloprostoru - tedy do polovičního objemu, než je tomu u dlouhých vlnových délek. Při vyzařování energie do polovičního objemu dojde ke zvýšení hladiny akustického tlaku zvuku o 6 dB. Baffle step korekce odstraňuje tento jev tak, že kmitočty pod stanoveným kmitočtem zesiluje, nebo naopak kmitočty nad stanoveným kmitočtem potlačuje, typicky o 6 dB [2].

Kompenzace impedance potlačuje nechtěné zdvihy v kmitočtové závislosti impedance reproduktorů. U hlubokotónového reproduktoru tedy potlačuje nárůst impedance za jmenovitou impedancí. Při ideální kompenzaci pak lze dosáhnout lineárního průběhu závislosti impedance na kmitočtu za rezonančním kmitočtem o hodnotě jmenovité impedance. Více o kmitočtové závislosti impedance reproduktorů je popsáno v kapitole 1.1.2.

U pasivních kmitočtových výhybek lze definovat několik parametrů. Základními parametry jsou: dělicí kmitočet, strmost, zatížitelnost, nominální impedance, počet pásem. Na obrázku 2 je uvedeno zjednodušené blokové schéma dvoupásmové výhybky, která dělí vstupní signál na dva výstupní kmitočtově omezené signály podle nastavených parametrů odpovídajících použitým reproduktorům [3].

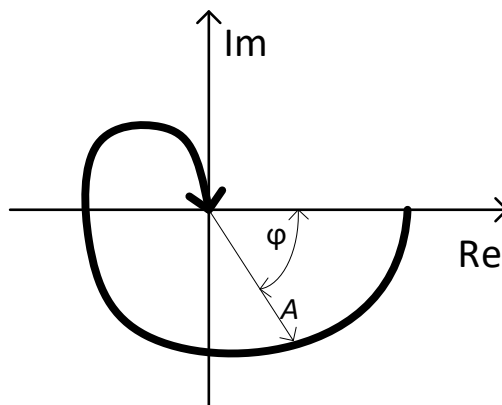


Obrázek 2. Zjednodušené blokové schéma dvoupásmové kmitočtové výhybky

Parametry reproduktorových kmitočtových výhybek nejsou pouze konstantní, ale některé jsou závislé na kmitočtu vstupního signálu. Rozeznáváme dvě základní charakteristiky kmitočtových výhybek, a to kmitočtovou charakteristiku a kmitočtovou závislost impedance. Tyto dvě charakteristiky jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

### 1.1.1 Kmitočtová charakteristika

Kmitočtová charakteristika obecného systému definuje míru přenosu napětí z jeho vstupu na jeho výstup, která je kmitočtově závislá. Tato kmitočtová charakteristika je komplexní veličinou. Kmitočtová charakteristika může být znázorněna v podobě amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky. Její příklad je uveden na obrázku 3, kde  $A$  je amplituda a  $\varphi$  je fáze.



Obrázek 3. Příklad amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky

Amplitudo-fázovou kmitočtovou charakteristiku lze však rozdělit do dvou charakteristik, a to na amplitudovou kmitočtovou charakteristiku a fázovou kmitočtovou charakteristiku. Nejběžnějším grafickým znázorněním je však vynesení kmitočtových charakteristik v logaritmických souřadnicích. Kmitočtové charakteristiky v logaritmických souřadnicích se znázorňují dvěma charakteristikami, a to modulovou kmitočtovou charakteristikou a fázovou kmitočtovou charakteristikou. Příklad modulové a fázové kmitočtové charakteristiky je na obrázku 4.

Přenosová funkce spojitého systému je v Laplaceově transformaci rovna podílu obrazů výstupní  $Y(s)$  a vstupní  $X(s)$  veličiny systému při nulových počátečních podmínkách

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}. \quad (1.1)$$

Kmitočtová charakteristiku systému se následně získá substitucí Laplaceova operátoru  $s$  za  $j\omega$ , kde  $j$  je imaginární jednotka a  $\omega$  je úhlový kmitočet

$$H(j\omega) = |H(s)|_{s=j\omega} = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (1.2)$$

Komplexní kmitočtová charakteristika je pak v kartézském tvaru definována svou reálnou a imaginární částí ve tvaru

$$H(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega), \quad (1.3)$$

kde  $P(\omega)$  je reálnou částí kmitočtové charakteristiky a  $Q(\omega)$  pak její imaginární částí. Při zobrazování kmitočtové charakteristiky se používá téměř výhradně kmitočtová charakteristika definovaná v polárním tvaru, je tedy definována jako modulová a fázová kmitočtová charakteristika, kde modulová kmitočtová charakteristika je definována jako absolutní hodnota

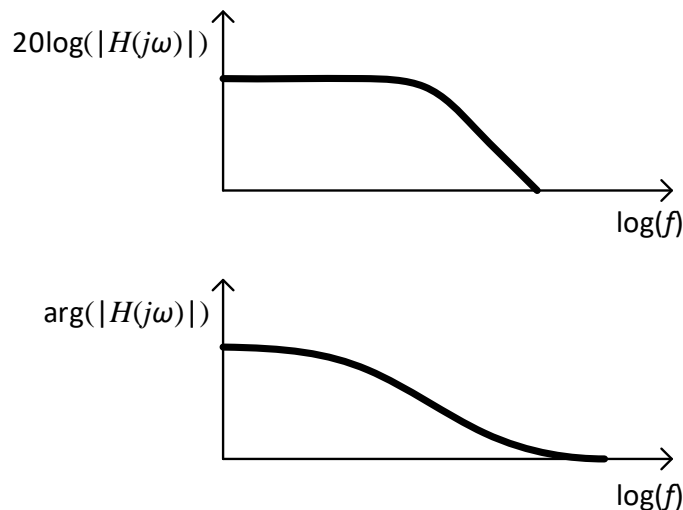
$$|H(j\omega)| = A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \quad (1.4)$$

a fázová kmitočtová charakteristika jako argument komplexní kmitočtové charakteristiky

$$\arg(H(j\omega)) = \varphi(\omega) = \tan^{-1} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (1.5)$$

Komplexní kmitočtová charakteristika v polárním tvaru je pak definována jako [2]

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (1.6)$$



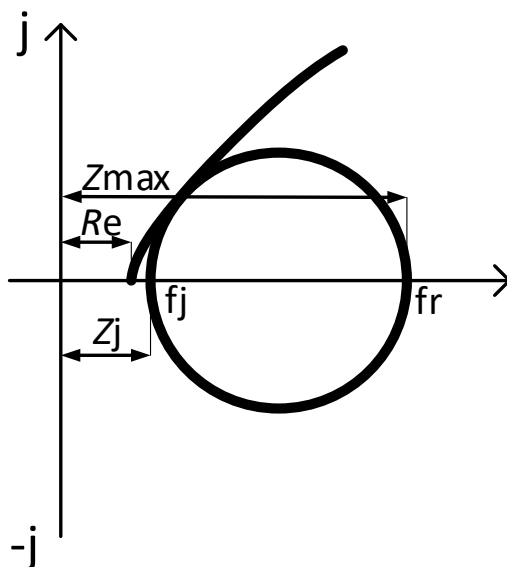
Obrázek 4. Příklad modulové a fázové kmitočtové charakteristiky

Modulová kmitočtová charakteristika je vynášena v úrovních jako  $20\log(|H(j\omega)|)$ , kdy osa  $x$  je logaritmická a vynáší se na ní kmitočet v Hz a na ose  $y$  se vynáší přenos v dB. Fázová kmitočtová charakteristika je vynášena jako  $\arg(H(j\omega))$ , kdy osa  $x$  je logaritmická a vynáší se na ní kmitočet v Hz a na ose  $y$  se vynáší fáze ve stupních nebo v radiánech.

### 1.1.2 Kmitočtová závislost impedance

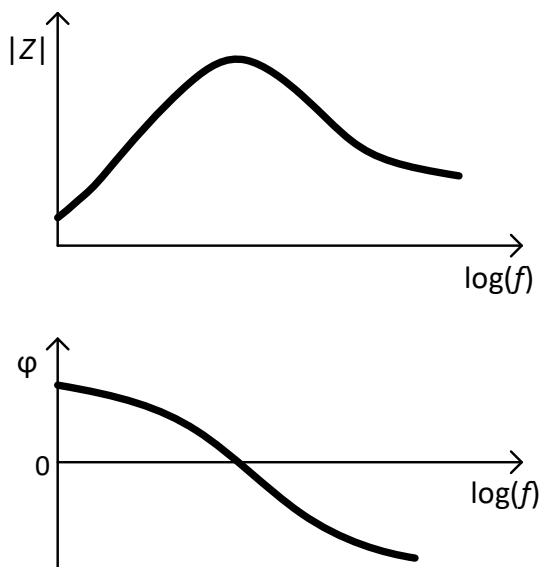
Kmitočtová závislost impedance definuje úroveň impedance, která je kmitočtově závislá. Na obrázku 5 je uveden hodograf (vektorová čára) impedance reproduktoru pro vyzařování bez

akustické impedance (ve vakuu). Pokud bude reproduktor pracovat do akustické zátěže, bude se průběh vektorové čáry k ideálnímu průběhu pouze blížit. Imaginární složka impedance bude nulová při rezonančním kmitočtu  $f_r$  a při kmitočtu jmenovité impedance  $f_j$  (lokální minimum za rezonančním kmitočtem). Díky tomu lze z fázové charakteristiky odečíst tyto dva kmitočty přesněji než z modulové charakteristiky.



Obrázek 5. Hodograf - Ideální impedance reproduktoru bez akustické zátěže

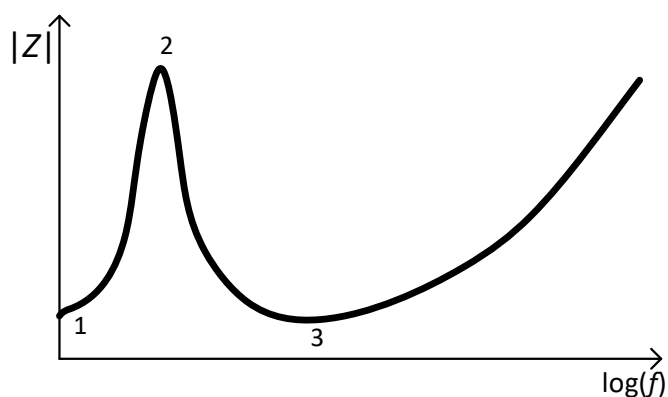
Toto grafické zobrazení impedance lze však rozdělit do dvou samostatných kmitočtových charakteristik zobrazujících absolutní hodnoty impedance a fázi pro sledované kmitočtové pásmo. Příklad charakteristik je uveden na obrázku 6 [4].



Obrázek 6. Příklad kmitočtových charakteristik impedance

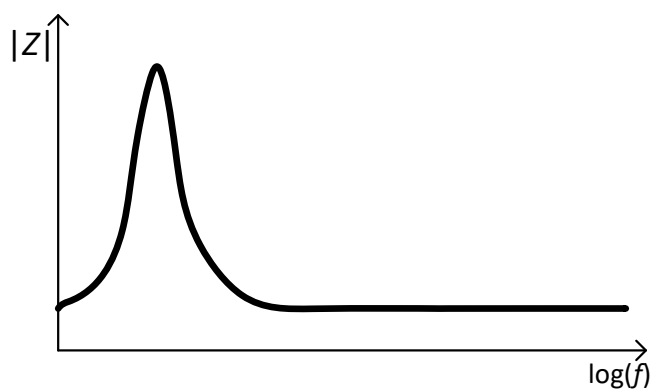
Jeden ze sledovaných parametrů reproduktoru v kmitočtové závislosti impedance je rezonanční kmitočet - rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostoru. Na tomto kmitočtu reproduktor dosahuje svého impedančního maxima. Jinak řečeno je to kmitočet, na

kterém by se rozkmital volně položený reproduktor bez ozvučnice po udeření do jeho membrány. Na obrázku 7 je uveden příklad kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru [5].



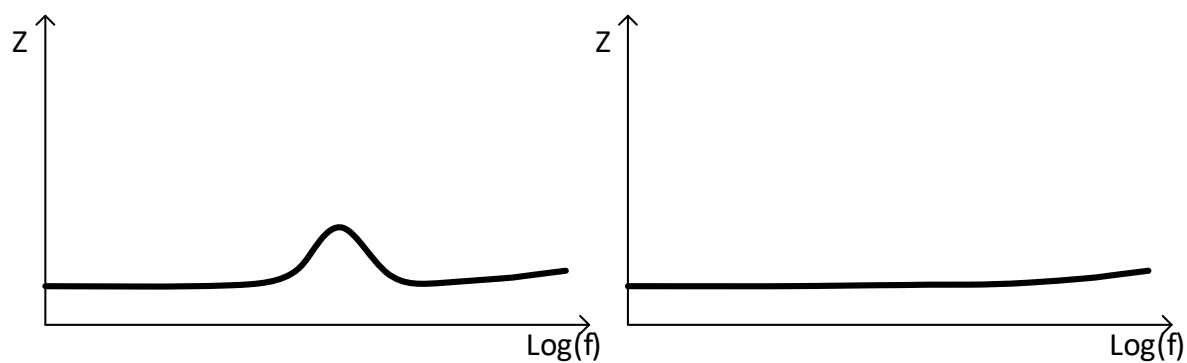
Obrázek 7. Příklad kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru

Na obrázku 7 jsou vidět tři významné body kmitočtové závislosti impedance, které definují základní parametry reproduktoru: bod 1 - stejnosměrný odpor, bod 2 - rezonanční kmitočet, bod 3 - jmenovitá impedance. Za bodem tři je vidět pozvolný nežádoucí nárůst impedance reproduktoru. Správně navržená reproduktorová výhybka s korekcí impedance reproduktoru tento nárůst potlačuje. Hodnota impedance pak již nenarůstá s kmitočtem, ale je konstantní o hodnotě jmenovité impedance. Průběh kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru s ideální kompenzací impedance je uveden na obrázku 8.



Obrázek 8. Příklad kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru s ideální kompenzací impedance

Na obrázku 9 je uvedena kmitočtová závislost impedance vysokotónového reproduktoru bez kompenzace (vlevo) a s ideální kompenzací impedance (vpravo).



Obrázek 9. Příklad kmitočtové závislosti impedance vysokotónového reproduktoru bez kompenzace (vpravo) a s ideální kompenzací impedance (vlevo)

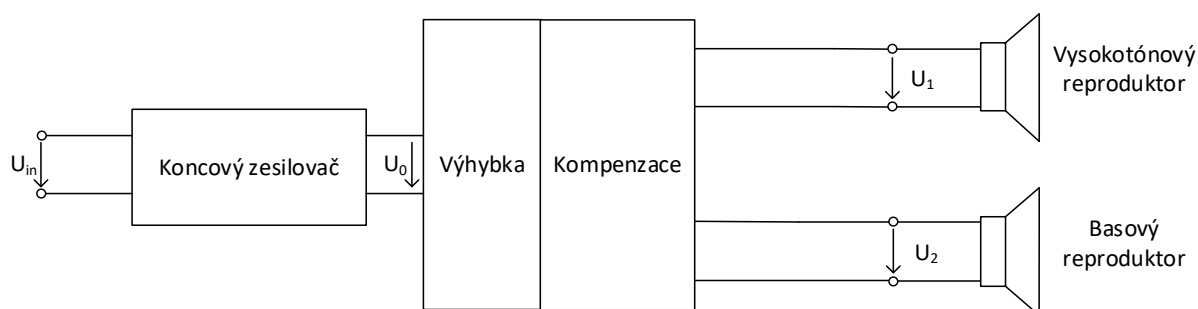
Při kompenzaci impedance vysokotónového reproduktoru dochází k potlačení impedance na rezonančním kmitočtu. Kmitočtová závislost impedance je pak téměř konstantní přes celé kmitočtové pásmo s mírným zdvihem na vyšších kmitočtech.



## 2. Způsob měření pasivních kmitočtových výhybek

Jak je zmíněno výše, pasivní výhybky obsahují pasivní součástky a jsou umístěny ve výkonové části elektroakustického řetězce. Díky tomu na průchozí výkonový signál působí nezanedbatelně i parazitní vlastnosti pasivních součástek. Tyto součástky proto nepůsobí pouze na kmitočtové pásmo v oblasti mezního kmitočtu, ale na celé kmitočtové pásmo. Pro definování přesného vlivu pasivních výhybek na průchozí signál, se měří jejich charakteristiky. Měření může být provedeno několika způsoby.

Měření kmitočtových charakteristik lze provést přímo na výstupu koncového zesilovače. Pro měření kmitočtové závislosti impedance je však zapotřebí vřadit bočník do elektroakustického řetězce, uvedeného na obrázku 10, pro možnost připojení měřicího zařízení.



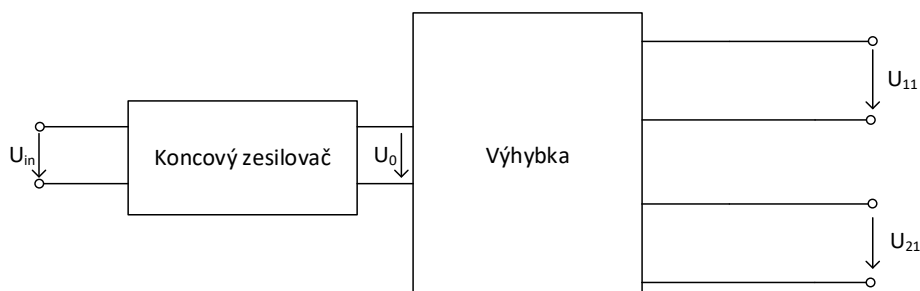
Obrázek 10. Zapojení elektroakustického řetězce

Bočník je v podstatě malá a velmi přesná impedance. Slouží k měření či detekci procházejícího proudu. Pokud bočníkem prochází proud, vyvolá na něm ubytek napětí, který je úměrný procházejícímu proudu dle Ohmova zákona.

Způsoby měření charakteristik reproduktorů a pasivních kmitočtových výhybek jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 2.1 Měření naprázdno

Všechna měření pasivních kmitočtových výhybek bez reálné reproduktorové soustavy probíhají bez kompenzací (kompenzace impedance). Prvním z možných zapojení je zapojení pro měření naprázdno. Schéma zapojení pro tento typ měření je uvedeno obrázku 11.



Obrázek 11. Zapojení elektroakustického řetězce pro měření naprázdno

Takto však nelze změřit kmitočtovou závislost impedance, ale pouze kmitočtovou charakteristiku pro jednotlivé kanály pasivní výhybky. Kmitočtovou charakteristiku lze z naměřených dat získat pomocí výpočtu modulu na jednotlivých kmitočtech podle rovnice

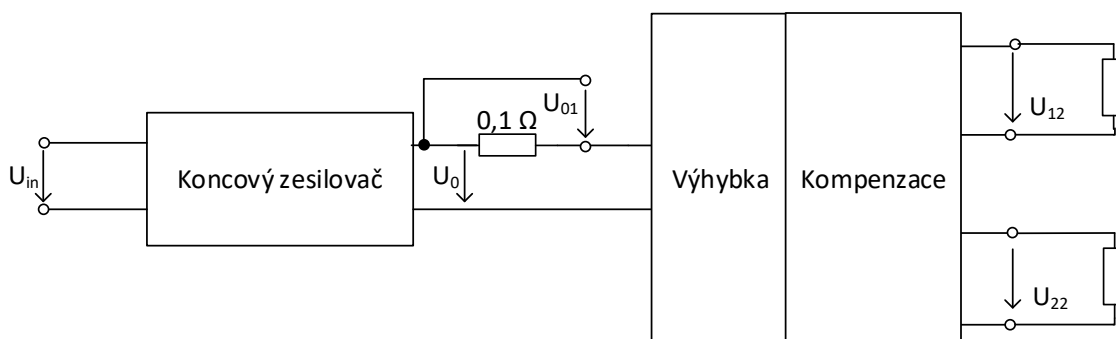
$$A = 20 \log\left(\frac{U_{11}}{U}\right) \text{ [dB]} \quad (2.1)$$

kde  $U_{11}$  je napětí na výstupu horní propusti ( $U_{21}$  napětí na výstupu dolní propusti) a  $U_0$  je napětí před úpravou kmitočtovou výhybkou. Po vypočtení modulů na všech měřených kmitočtech lze vynést grafickou závislost modulu na kmitočtu - modulovou kmitočtovou charakteristiku.

Pro měření kmitočtové závislosti impedance je zapotřebí připojit zátěž (a bočník) na výstupní svorky koncového zesilovače tak, aby přes bočník protékal proud, pomocí kterého by následně byla definována kmitočtová závislost impedance pasivní kmitočtové výhybky. Pro měření kmitočtové závislosti impedance lze tedy použít následující dva typy měření.

## 2.2 Měření s reálnou zátěží

Další možností je měření s reálnou impedancí. Hodnota připojené impedance má stejnou hodnotu, jako jmenovitá impedance připojovaných reproduktorů. Schéma zapojení pro tento typ měření je uvedeno obrázku 12. Při měření je ovšem zapotřebí vždy vyřadit buď jeden z kanálů výhybky, aby proud tekoucí bočníkem byl proud pouze přes jeden kanál pasivní reproduktorové výhybky.



Obrázek 12. Zapojení elektroakustického řetězce pro měření s reálnou impedancí

Tímto způsobem lze již získat jak kmitočtovou charakteristiku, tak i kmitočtovou závislost impedance. Pro získání kmitočtové charakteristiky lze použít obdobný postup jako je uveden v předchozí kapitole. Pro získání kmitočtové závislosti impedance je zapotřebí nejdříve pro jednotlivé měřené kmitočty vypočítat proud tekoucí bočníkem pomocí vzorce

$$I_Z = \frac{U_{01}}{0,1} \text{ [A]} \quad (2.2)$$

kde  $U_{01}$  je napětí na bočníku. Následně pomocí změřeného napětí  $U_{12}$  ( $U_{22}$ ) lze dopočítat hodnota impedance jako

$$Z = U_{12} I_Z \text{ [}\Omega\text{]} \quad (2.3)$$

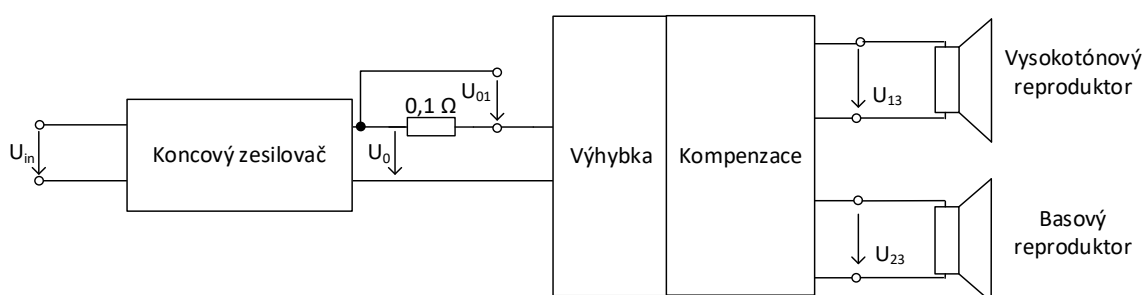
Po vypočtení impedance na všech měřených kmitočtech lze vynést grafickou závislost impedance na kmitočtu - kmitočtovou závislost impedance.

Při měření s reálnou impedancí nedochází k rušení spolupracovníků reprodukováným zvukem v průběhu měření. Reálná impedance má však jinou kmitočtovou závislost impedance než reproduktor, v jehož kmitočtové závislosti impedance lze sledovat různé lokální nárůsty, či

poklesy impedance v závislosti na kmitočtu. Příklad kmitočtové závislosti impedance hlubokotónového reproduktoru je uveden na obrázku 7.

## 2.3 Měření s reproduktorem

Probíhá-li měření v prostoru, kde nedochází k rušení spolupracovníků reprodukováným zvukem v průběhu měření, je ideální varianta měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek se zatížením řetězce reproduktorovou soustavou. Schéma zapojení pro tento typ měření je uvedeno obrázku 13. Při měření je ovšem zapotřebí vždy vyřadit jeden kanál výhybky, aby proud tekoucí bočnickem byl proud pouze přes jeden kanál pasivní reproduktorové výhybky.



Obrázek 13. Zapojení elektroakustického řetězce pro měření s reproduktorem

Kmitočtovou charakteristiku a kmitočtovou závislost impedance lze pak získat stejnými postupy jako je uvedeno v předchozích kapitolách.

Při tomto měření probíhá měření pasivní kmitočtové výhybky přímo s reproduktorem, pro který je navržena. Takto získané charakteristiky reproduktoru jsou nejpřesnější.

### 3. Návrh přípravků pro měření

V předchozí kapitole je pojednáno o principech měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek. Pro samotné měření je tedy zapotřebí několik přípravků, díky kterým lze změřit požadované charakteristiky pasivních kmitočtových výhybek. Pro měření je zapotřebí: koncový zesilovač, bočník, reálná impedance. V této kapitole jsou dále popsány požadavky na jednotlivé přípravky, které jsou následně navrženy jako jednotlivé moduly použitelné pro měření.

Při návrhu přípravků se musí již od první fáze počítat i s finální podobou jednotlivých modulů. Podoba modulů by měla vycházet z podstaty samotného užití modulů a měla by být uživatelsky co nejprívětivější.

Jedním ze základních požadavků je rozdělení potřebných zařízení pro měření na samostatné moduly pro možnost jejich nezávislého použití. Dalším z požadavků na navrhované moduly je jejich velikost. Měli by být, pokud možno co nejmenší pro snadnou manipulaci. Dále každý modul musí být osazen konektory odpovídajícími jeho použití. Podrobnější popis požadavků na jednotlivé moduly je uveden v následujících podkapitolách, v kterých je popsán i samotný návrh potřebných modulů.

#### 3.1 Požadavky na koncový zesilovač

Koncový zesilovač je prvek v měřeném elektroakustickém řetězci, který je potřebný k zesílení vstupního signálu na potřebnou úroveň. Základními požadavky na koncový zesilovač jsou: minimální zkreslení, zesílení 18 dB. Dále pro univerzálnost použití je požadována možnost připojení jak symetrického, tak i nesymetrického vstupního signálu.

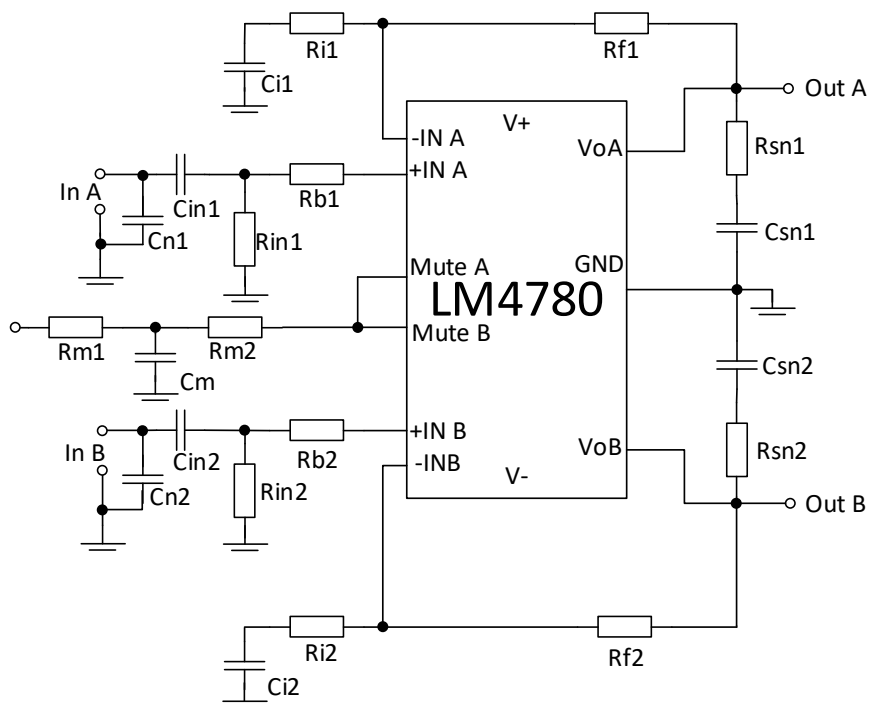
Řešení koncového zesilovače bude dále obsahovat zdroj pro koncový zesilovač, a obvod pro odpojení/připojení výstupu z koncového zesilovače na výstupní konektor. Tento obvod bude fungovat tak, že při přivedení síťového napětí dojde s určitým zpožděním k připojení výstupního konektoru k výstupu z koncového zesilovače.

##### 3.1.1 Návrh obvodu koncového zesilovače

Pro splnění všech požadavků, byl pro realizaci (dvojitého) koncového zesilovače vybrán integrovaný obvod LM4780 (tato varianta byla vybrána pro možnost využití navržené DPS i v jiných realizacích, kde bude zapotřebí dvoukanálový zesilovač - v této práci bude však využit pouze jeden kanál). Jedná se o obvod dvojitého koncového zesilovače s typickými parametry: THD+N (2 x 30 W do 8  $\Omega$  zátěže) = 0,03 %, THD+N (2 x 30 W do 4  $\Omega$  zátěže) = 0,07 %, SR = 19 V/ $\mu$ s. Tento obvod disponuje také funkcí Mute (ztlumení), která při návrhu koncového zesilovače dle požadavků nebude potřeba, ale pro případné univerzální použití navržené DPS (desky plošných spojů) bude při návrhu realizována. Další parametry jsou dohledatelné v technické dokumentaci obvodu uvedeném v seznamu literatury [6].

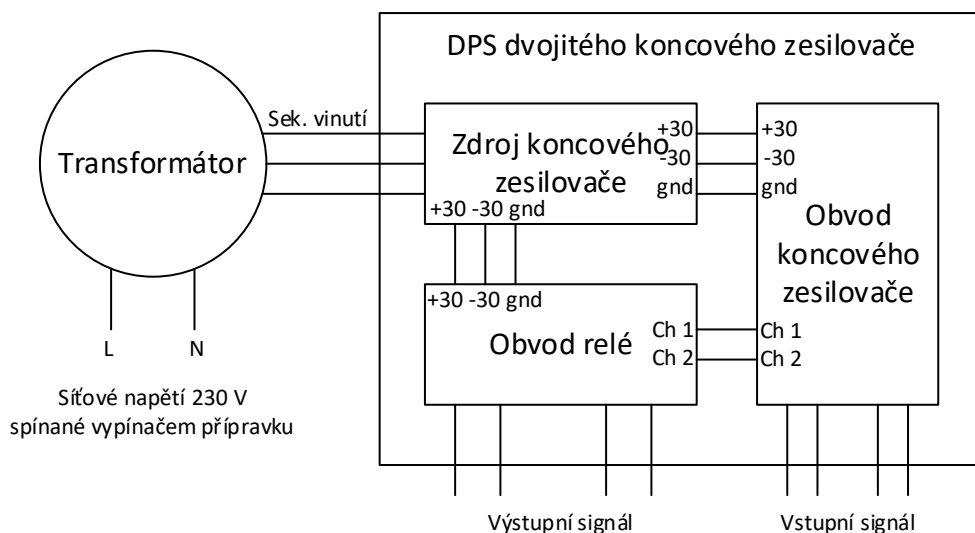
Na obrázku 14 je pro svoji složitost uvedeno ideové zapojení koncového zesilovače. Ideové, protože ve finální podobě ještě obsahuje spínací obvod vybavený pomocí relé, kdy uživatel bude pomocí vypínače přivádět výstup koncového zesilovače na výstupní konektor. Blokové schéma koncového zesilovače, v podobě použité pro navrhovaný modul, je uvedeno na obrázku 15. Pro větší univerzálnost a pro možnost použití dvojitého koncového zesilovače i ve složitějších zařízeních, má relé samostatný napájecí obvod na desce dvojitého koncového

zesilovače. Díky rozdělení napájecích zdrojů pro dvojitý koncový zesilovač a obvod se spínacím relé je získána možnost ovládání odpojení výstupního signálu z dvojitého koncového zesilovače nezávisle na odpojení napájení samotného koncového zesilovače. Dále je při návrhu využita funkce Mute vybraného obvodu. Tato funkce může být využívána zejména ve složitějších zařízeních, kdy při nevyužívání dvojitého koncového zesilovače může být tento obvod převeden do režimu s nižší spotřebou a tím šetřit náklady na provoz zařízení. Pokud tato funkce nebude využívána, dá se vyřadit propojkou, která obvod uvede do permanentního aktivního stavu.



Obrázek 14. Schéma zapojení dvojitého koncového zesilovače s LM4780

Napájení dvojitého koncového zesilovače je řešeno transformátorem, který bude uchycen samostatně v přístrojové skříni. Usměrnění a filtrace napájecího napětí je pak řešeno na desce dvojitého koncového zesilovače.



Obrázek 15. Blokové schéma zapojení dvojitého koncového zesilovače

Požadavky na návrh jsou: zesílení 18 dB, minimální zkreslení, minimální přeslechy mezi kanály. Zesílení tohoto obvodu lze spočítat pomocí vztahu:

$$A_u = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{U_1(1 + \frac{R_2}{R_1})}{U_1} = 20 \log(1 + \frac{R_2}{R_1}) \text{ [dB]}, \quad (3.1)$$

kde  $U_1$  je vstupní napětí,  $U_2$  výstupní napětí a  $R_2/R_1$  poměr odporů ve zpětné vazbě  $R_i/R_f$ . Z tohoto vztahu pak lze vypočítat poměr  $R_2/R_1$  jako  $R_2 = 20,83 \text{ k}\Omega$  při definování hodnoty  $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ .

Kombinace odporů a kondenzátorů  $C_{in}$ ,  $R_{in}$  a  $C_i$ ,  $R_i$  udávají mezní kmitočet filtru typu dolní propust. Pro výpočet mezního kmitočtu lze využít vztah

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} \text{ [Hz]}. \quad (3.2)$$

Pro výpočet hodnot  $C_{in}$  a  $R_{in}$  je určena hodnota  $C_{in} = 2,2 \text{ }\mu\text{F}$ . Hodnota  $R_{in}$  je vypočtena na  $33 \text{ k}\Omega$  pro získání mezního kmitočtu  $2,2 \text{ Hz}$ . Hodnoty  $C_i$  a  $R_i$  jsou vypočteny jako  $22 \text{ }\mu\text{F}$  a  $3 \text{ k}\Omega$  s mezním kmitočtem  $2,4 \text{ Hz}$ . Předřadný odpor  $R_B$  by měl být stejný jako  $R_i$ , tedy  $3 \text{ k}\Omega$ .

Kombinace odporů a kondenzátorů  $C_{SN}$  a  $R_{SN}$  je tzv. Boucherotův člen. Jeho smyslem je korigovat komplexní charakter zátěží (reproduktoru) pro zajištění kmitočtové stability zesilovače. Hodnoty  $C_{SN}$  a  $R_{SN}$  jsou použity z typického zapojení LM4780 z technické dokumentace obvodu, a to  $0,1 \text{ }\mu\text{F}$  a  $2,7 \text{ }\Omega$ .

Jak bylo zmíněno, tento obvod disponuje funkcí Mute, která bude při návrhu využita. Proud  $I_{mute}$  by měl být minimálně  $0,5 \text{ mA}$  pro jeden pin. Jelikož je uvažováno, že budou piny spřaženy a bude k nim veden jeden přívod, tak je zapotřebí proudu dvojnásobného. Pro správnou funkci a omezení samovolného přecházení obvodu z Mute módu a zpět, vlivem kolísání záporného napájecího napětí, by měl být proud  $I_{mute}$  alespoň  $2 \text{ mA}$  [6].

Časová konstanta, definována součástkami  $C_M$  a  $R_M$ , je stanovena pomocí vzorce 3.3 na  $82 \text{ ms}$ .

$$\tau = RC. \quad (3.3)$$

V tabulce 1 je soupis všech typů a hodnot použitých součástek (s výjimkou součástek použitých pro realizaci zdrojů).

Tabulka 1. Typy a hodnoty součástek dvojitého koncového zesilovače

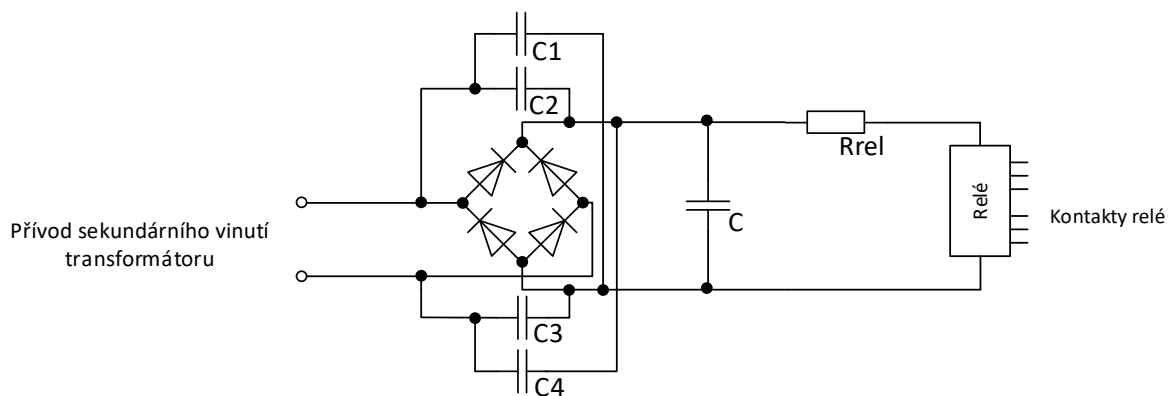
Součástka	typ	hodnota
$R_{in1}, R_{in2}$	SMD; 0,25 W	33 k $\Omega$
$C_{in1}, C_{in2}$	THT; polyesterový; 63 V	2,2 $\mu$ F
$R_{i1}, R_{i2}, R_{b1}, R_{b2}$	SMD; 0,25 W	3 k $\Omega$
$C_{i1}, C_{i2}$	SMD; elektrolytický; 16 V	22 $\mu$ F
$R_{f1}, R_{f2}$	SMD; 0,25 W	21 k $\Omega$
$R_{sn1}, R_{sn2}$	SMD; 0,25 W	2,7 $\Omega$
$C_{sn1}, C_{sn2}$	THT; keramický; 500 V	0,1 $\mu$ F
$R_{m1}$	SMD; 0,25 W	8,2 k $\Omega$
$R_{m2}$	SMD; 0,25 W	15 k $\Omega$
$C_m$	THT; elektrolytický; 63 V	10 $\mu$ F

Dalšími součástkami jsou součástky v zapojení zdroje dvojitého koncového zesilovače, který je na stejné desce s obvodem dvojitého koncového zesilovače. Hodnota filtračních kondenzátorů zdroje lze vypočítat jako

$$C = \frac{kI_{výst}}{pU_{ss}} [\mu F]. \quad (3.4)$$

Pro docílení malého zvlnění je uvažován činitel  $p \leq 0,01$  (1 % a menší).  $U_{ss}$  je výstupní stejnosměrné napětí,  $I_{výst}$  proud odebíraný zátěží a  $k$  je konstanta (pro dvoucestné usměrnění je rovna 600). Pomocí tohoto vztahu byla hodnota elektrolytických filtračních kondenzátorů určena na 4,7 mF. Další použité součástky v obvodu zdroje jsou: keramické kondenzátory 0,1  $\mu$ F, SMD keramické kondenzátory 47 nF, Graetzův můstek  $U_{max} = 1$  kV,  $I_f = 15$  A,  $I_{fsm} = 200$  A [7]. Vybraný transformátor pro zdroj koncového zesilovače je TST 200/14. Jedná se o toroidní transformátor o výkonu 200 VA, průměru 120 mm a výšce 50 mm.

Posledním obvodem, použitým na desce dvojitého koncového zesilovače, je obvod pro spínání relé se samostatným zdrojem. Funkce obvodu je odpojení/připojení výstupního konektoru (reproduktorové zátěže) na výstup koncového zesilovače. Parametry vybraného relé pro tento účel jsou: DPDT,  $I_{max} = 8$  A,  $U_{cívky} = 24$  V. Další parametry jsou dohledatelné v technické dokumentaci obvodu [8]. Principiální zapojení je uvedeno na obrázku 16.



Obrázek 16. Principiální zapojení relé

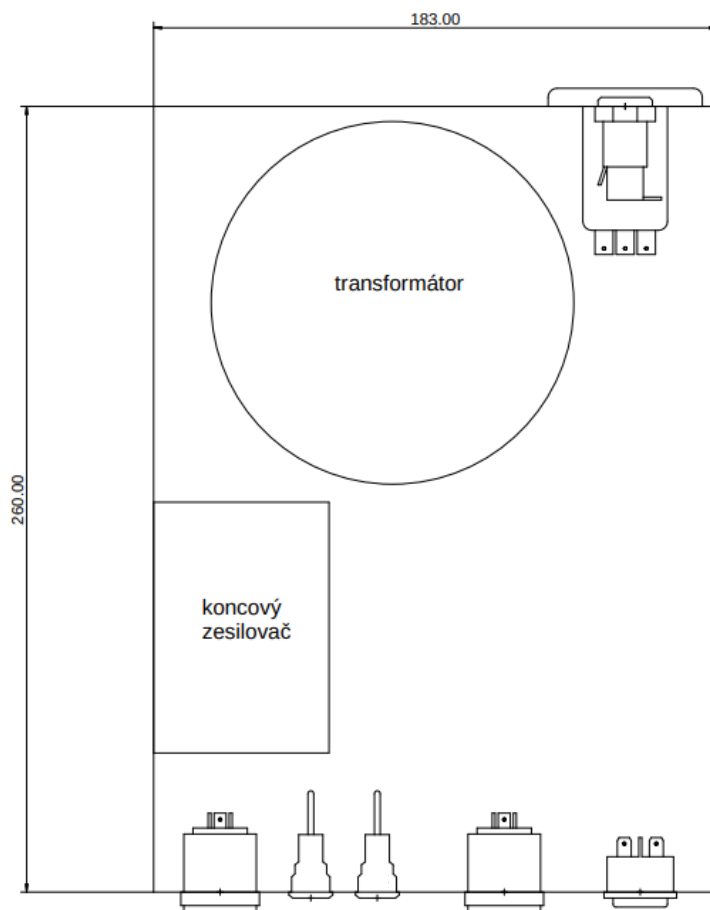
Součástky C1 až C4 jsou SMD kondenzátory keramické o hodnotě 47 nF,  $R_{rel}$  sériově řazený odpor k relé, jehož hodnota se určí z napětí cívky relé 24 V, hodnotou maximálního proudu cívky 8 A a přivedeným napětím na Greatzův můstek.

### 3.1.2 Návrh podoby koncového zesilovače

Při návrhu podoby modulu koncového zesilovače je potřeba počítat se všemi parametry jako jsou: rozměry transformátoru, rozměry navrhované DPS, potřebné konektorové osazení, potřeba chlazení koncového zesilovače, .... Z požadavků lze definovat potřebné konektorové osazení budoucí přístrojové skříně.

Pro přívod vstupního signálu bude modul koncového zesilovače opatřen XLR-TRS. Pro výkonový výstup z koncového zesilovače bude využit 2-pinový SPEAKON konektor. Pro připojení k výkonovému výstupu bude přípravek opatřen navíc zdírkami pro banánky. Ty budou připojeny paralelně k 2-pinovému konektoru. Dalším potřebným konektorem pro modul koncového zesilovače je konektor pro přívod napájecího napětí. Pro tento účel je vybrán napájecí euro konektor s filtrem pro jmenovitý proud 10 A. Tento konektor slouží pro přivedení síťového napětí a filtraci ruchů ze sítě. Tento konektor je dále doplněn o pojistkové pouzdro. V neposlední řadě je zapotřebí modul koncového zesilovače osadit vypínačem, který bude spínat oba dva pracovní vodiče.





Obrázek 17. Rozložení prvků modulu koncového zesilovače

Při uvažování všech parametrů, byla pro koncový zesilovač vybrána přístrojová skříň o rozměrech 226,5/271/70 mm (vnitřní rozměry 183/260/60 mm). Na obrázku 17 je uvedeno navržené rozložení jednotlivých prvků modulu koncového zesilovače uvnitř přístrojové skříně. Jelikož je vybrána skříň již s integrovaným chladičem, není zapotřebí zabudovávat chladič další a pro chlazení koncového zesilovače bude využit chladič integrovaný.

Při realizaci koncového zesilovače (jejíž postup je popsán v kapitole 5.1) však vznikl jeden závažný problém s dostupností obvodu LM4780 a dále i další požadavky, které vedly ke změně celého návrhu. Z těchto důvodů bylo od realizace navrženého koncového zesilovače odstoupeno a proběhl nový návrh řešení koncového zesilovače, který je popsán v kapitole 3.1.3.

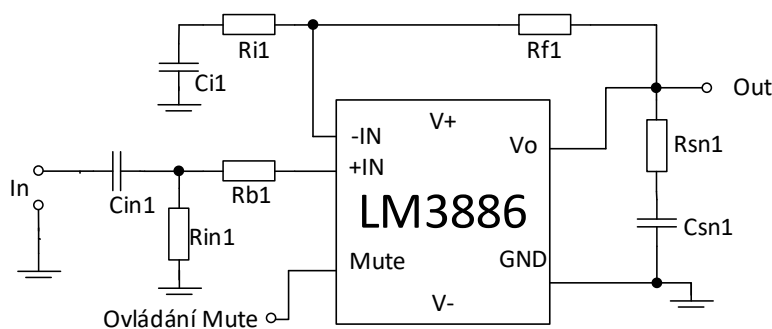
Zmíněným závažným problémem je, že při ožiování druhého kusu koncového zesilovače došlo i přes důkladné proměřování parametrů a ověřování funkčnosti celého zapojení ke zničení integrovaného obvodu LM4780. K dispozici byly ještě dva náhradní obvody, kdy však při ožiování bylo zjištěno, že jeden z obvodů je vadný (při přivedení signálu na vstup byla na osciloskopu naměřena stejnosměrná složka o hodnotě  $V_{CC}/2$ ). Při realizaci bylo dále zjištěno, že obvod LM4780 se přestal vyrábět a není již nikde klasickou distribuční cestou k sehnání. Druhý náhradní čip byl tedy ponechán jako rezervní, pro přípravu mAPC-X2, kde je tento obvod využíván.

### 3.1.3 Návrh druhé verze koncového zesilovače

Nově vzniklé požadavky na koncový zesilovač jsou: možnost změny vstupní citlivosti v rozmezí + 9 dB až -24 dB s krokem 3 dB. Dále je požadováno, aby zhotovovaný koncový zesilovač měl nakonec možnost připojení dvou kanálů, aby bylo umožněno nastavit celkové zesílení celého řetězce na 0 dB a zároveň také otočení fáze o 180 ° každého z kanálů koncového zesilovače zvlášť.

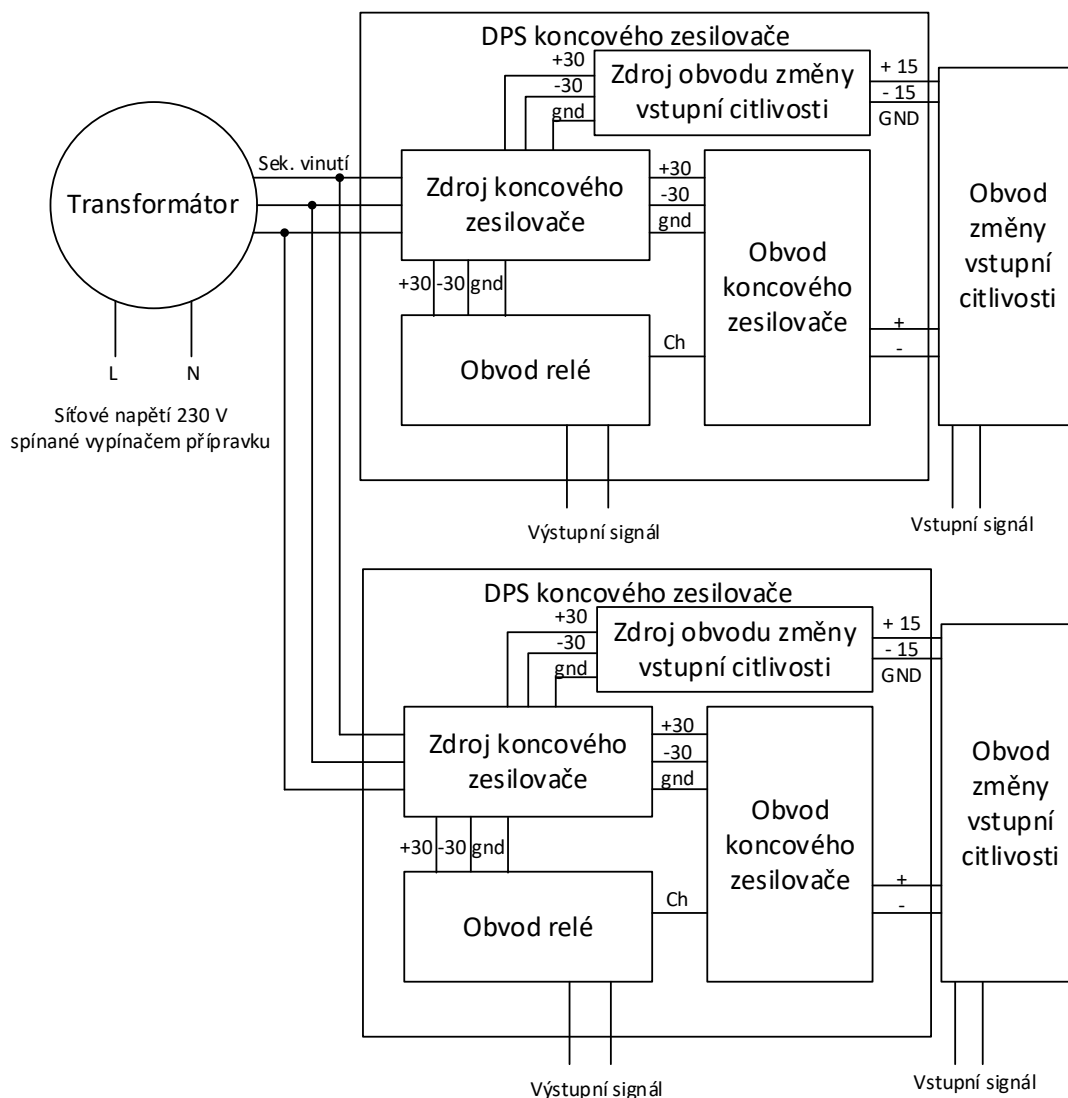
Pro splnění všech požadavků, které byly změněny a jsou požadovány po navrhovaném dvojitém koncovém zesilovači, byl pro realizaci dvojitého koncového zesilovače vybrán integrovaný obvod LM3886, který je velmi podobný obvodu LM4780, ale obsahuje pouze jeden kanál. Při této realizaci tedy budou použity tyto obvody dva, kdy pro lepší distribuci tepla, obvody vytvářeného bude každý z obvodů umístěn na jeden ze dvou chladičů uvažované přístrojové skříně. Obvod LM3886 také disponuje také funkcí Mute (ztlumení), která při návrhu koncového zesilovače dle nových požadavků již bude zapotřebí, a proto bude při návrhu ověřena a na DPS následně realizována.

Na obrázku 18 je pro svoji složitost uvedeno ideové zapojení koncového zesilovače. Ideové, protože ve finální podobě ještě obsahuje spínací obvod vybavený pomocí relé, kdy uživatel bude pomocí vypínače přivádět výstup koncového zesilovače na výstupní konektor. Blokové schéma dvojitého koncového zesilovače, rozkreslené podle toho, jak bude ve finále rozděleno na DPS je uvedeno na obrázku 19. Při návrhu je využita funkce Mute vybraného obvodu. Tato funkce může být využívána v případech, kdy při nevyužívání dvojitého koncového zesilovače může být tento obvod převeden do režimu s nižší spotřebou a tím šetřit náklady na provoz zařízení.



Obrázek 18. Ideové zapojení koncového zesilovače s LM3886

Napájení koncového zesilovače je řešeno transformátorem, který bude uchycen samostatně v přístrojové skříně. Usměrnění a filtrace napájecího napětí je pak řešeno na každé desce koncového zesilovače samostatně.



Obrázek 19. Blokové schéma zapojení druhé verze dvojitého koncového zesilovače

Požadavky na návrh jsou: zesílení 18 dB, minimální zkreslení, minimální přeslechy mezi kanály. Zesílení tohoto obvodu lze spočítat pomocí vztahu:

$$A_u = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{U_1(1 + \frac{R_2}{R_1})}{U_1} = 20 \log(1 + \frac{R_2}{R_1}) [\text{dB}], \quad (3.1)$$

kde  $U_1$  je vstupní napětí,  $U_2$  výstupní napětí a  $R_2/R_1$  poměr odporů ve zpětné vazbě  $R_i/R_f$ . V požadavku je možnost přepínání zesílení koncového zesilovače mezi 0 a +18 dB. Z důvodu použití pasivního děliče pro změnu vstupní citlivosti, jehož volba a návrh je popsán v této kapitole níže, je zesílení koncového zesilovače posunuto o +9 dB a to na +9 a +27 dB. Přepínání mezi různými hodnotami zesílení je řešeno přepínačem, který připne k odporu  $R_{f1}$  ve zpětné vazbě paralelní odpor a tím sníží zesílení o 18 dB. Vypočtené hodnoty odporů jsou:  $R_{i1} = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{f1} = 62 \text{ k}\Omega$  a  $R_{f2} = 6,2 \text{ k}\Omega$ .

Kombinace odporů a kondenzátorů  $C_{in}$ ,  $R_{in}$  a  $C_1$ ,  $R_1$  udávají mezní kmitočet filtru typu dolní propust. Pro výpočet mezního kmitočtu lze využít vztah

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} [\text{Hz}]. \quad (3.2)$$

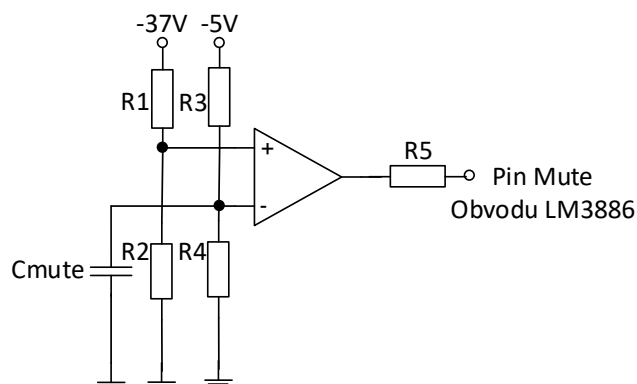
Pro výpočet hodnot  $C_{in}$  a  $R_{in}$  je určena hodnota  $C_{in} = 0,64 \mu F$ . Hodnota  $R_{in}$  je vypočtena na  $100 k\Omega$  pro získání mezního kmitočtu  $2,5 Hz$ . Hodnoty  $C_i$  a  $R_i$  jsou vypočteny jako  $22 \mu F$  a  $3 k\Omega$  s mezním kmitočtem  $2,4 Hz$ . Předřadný odpor  $R_B$  by měl být stejný jako  $R_i$ , tedy  $3 k\Omega$ .

Kombinace odporů a kondenzátorů  $C_{SN}$  a  $R_{SN}$  je tzv. Boucherotův člen. Jeho smyslem je korigovat komplexní charakter zátěží (reproduktoru) pro zajištění kmitočtové stability zesilovače. Hodnoty  $C_{SN}$  a  $R_{SN}$  jsou použity z typického zapojení LM3886 z technické dokumentace obvodu, a to  $0,1 \mu F$  a  $2,7 \Omega$ .

Časová konstanta, definována součástkami  $C_M$  a  $R_M$ , je stanovena pomocí vzorce 3.3 na  $82 ms$ .

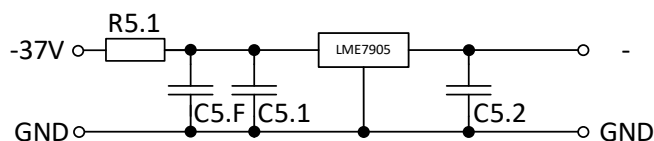
$$\tau = RC. \quad (3.3)$$

Jak bylo zmíněno, tento obvod disponuje funkcí Mute, která bude při návrhu využita. Proud  $I_{mute}$  by měl být minimálně  $0,5 mA$ . Pro správnou funkci a omezení samovolného přecházení obvodu z Mute módu a zpět, vlivem kolísání záporného napájecího napětí, by měl být proud  $I_{mute}$  alespoň  $1 mA$  [12]. Při ověřování správnosti této funkce byla pro okamžité přecházení obvodu z Mute módu a zpět zvolena varianta, kdy se do zapojení přidal komparátor pro rychlou změnu proudu tekoucího do pinu Mute. Zapojení komparátoru je uvedeno na obrázku 20.



Obrázek 20. Zapojení komparátoru pro ovládání stavu Mute koncového zesilovače

Hodnoty odporů  $R1$  a  $R2$  byly vypočteny tak, aby při poklesu napájecího napětí na úroveň  $27 V$  došlo k automatickému přechodu obvodu do stavu Mute. Hodnoty těchto odporů byly stanoveny na hodnoty  $R1 = 100 k\Omega$  a  $R2 = 10 k\Omega$ . Odpor  $R3$  a  $R4$  byly určeny jako  $R3 = R4 = 22 k\Omega$ . Odpor  $R5$  byl vypočten a následně na nepájivém poli při testování celého zapojení ověřen o hodnotě  $4,7 k\Omega$ . Pro obvod komparátoru byl zvolen obvod s označením TL331. Pro úroveň  $-5 V$  byl navržen samostatný zdroj, jehož zapojení je uvedeno na obrázku 21



Obrázek 21. Zdroj pro komparátor -5 V

kde  $R5.1$  je vypočten o hodnotě  $3 k\Omega$ ,  $C5.F = 47 \mu F$  a  $C5.1 = C5.2 = 0,1 \mu F$ .

V tabulce 2 je soupis všech typů a hodnot použitých součástek (s výjimkou součástek použitých pro realizaci zdrojů.)

Tabulka 2. Typy a hodnoty součástek koncového zesilovače s obvodem LM3886

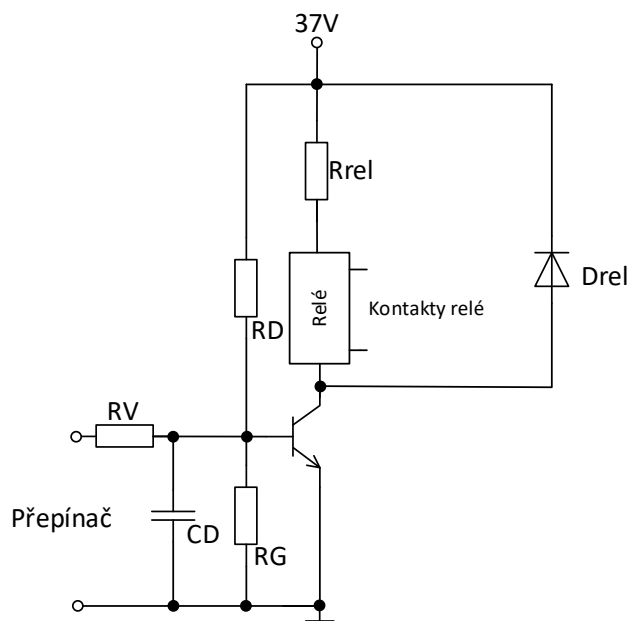
Součástka	typ	hodnota
$R_{in1}$	SMD; 0,25 W	33 k $\Omega$
$C_{in1}$	THT; polyesterový; 63 V	2,2 $\mu$ F
$R_{i1}R_{b1}$	SMD; 0,25 W	3 k $\Omega$
$C_{i1}$	SMD; elektrolytický; 16 V	22 $\mu$ F
$R_{f1}$	SMD; 0,25 W	21 k $\Omega$
$R_{sn1}$	SMD; 0,25 W	2,7 $\Omega$
$C_{sn1}$	THT; keramický; 500 V	0,1 $\mu$ F
$R_1$	SMD; 0,25 W	100 k $\Omega$
$R_2$	SMD; 0,25 W	1 k $\Omega$
$R_3, R_4$	SMD; 0,25 W	22 k $\Omega$
$R_5$	SMD; 0,25 W	4,7 k $\Omega$
$C_{mute}$	THT; elektrolytický; 63 V	220 $\mu$ F

Dalšími součástkami jsou součástky v zapojení zdroje koncového zesilovače, který je na stejné desce s obvodem koncového zesilovače. Hodnota filtračních kondenzátorů zdroje lze vypočítat jako

$$C = \frac{kI_{výst}}{pU_{ss}} \text{ [}\mu\text{F]}. \quad (3.4)$$

Pro docílení malého zvlnění je uvažován činitel  $p \leq 0,01$  (1 % a menší).  $U_{ss}$  je výstupní stejnosměrné napětí,  $I_{výst}$  proud odebíraný zátěží a  $k$  je konstanta (pro dvoucestné usměrnění je rovna 600). Pomocí tohoto vztahu byla hodnota elektrolytických filtračních kondenzátorů určena na 4,7 mF. Další použité součástky v obvodu zdroje jsou: keramické kondenzátory 0,1  $\mu$ F, SMD keramické kondenzátory 47 nF, Graetzův můstek  $U_{max} = 1$  kV,  $I_f = 15$  A,  $I_{fsm} = 200$  A [7]. Vybraný transformátor pro zdroj koncového zesilovače je TST 200/14. Jedná se o toroidní transformátor o výkonu 200 VA, průměru 120 mm a výšce 50 mm.

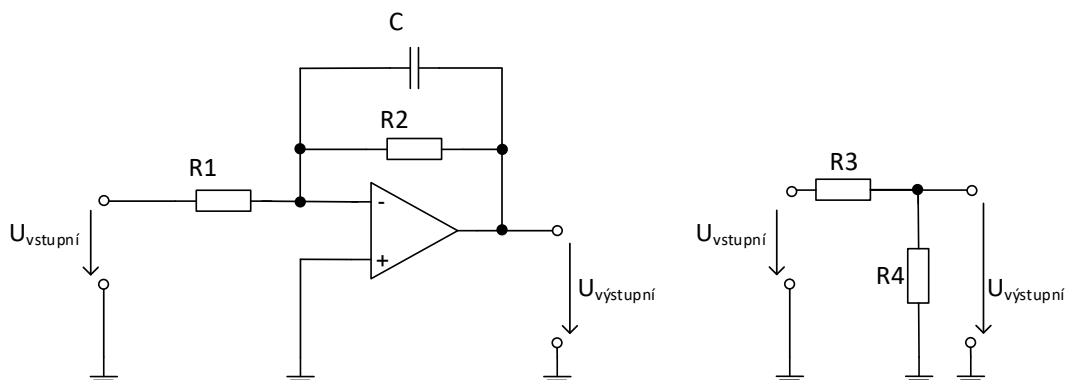
Dalším obvodem, použitým na desce koncového zesilovače, je obvod pro spínání relé. Funkce obvodu je odpojení/připojení výstupního konektoru (reproduktorové zátěže) na výstup koncového zesilovače. Parametry vybraného relé pro tento účel jsou: SPST,  $I_{max} = 10$  A,  $U_{cívky} = 24$  V. Další parametry jsou dohledatelné v technické dokumentaci obvodu [13]. Principiální zapojení je uvedeno na obrázku 22.



Obrázek 22. Principiální zapojení relé

Odpory RD a RG jsou vypočteny o hodnotě 43 k $\Omega$ , Rrel na hodnotu 360  $\Omega$  a CD na 68  $\mu$ F, RV = 1,2  $\Omega$ . Toto zapojení je následně ověřeno na nepájivém poli. Pro signalizaci sepnutého a rozepnutého stavu je do zapojení umístěna LED s předřadným odporem. Použitý tranzistor je s označením BC846.

Pro splnění požadavku změny vstupní citlivosti byly uvažovány dvě varianty řešení, a to buď pasivním děličem - uvedeno na obrázku 23 vpravo, nebo pomocí zapojení invertujícího zesilovače - uvedeného na obrázku 23 vlevo.



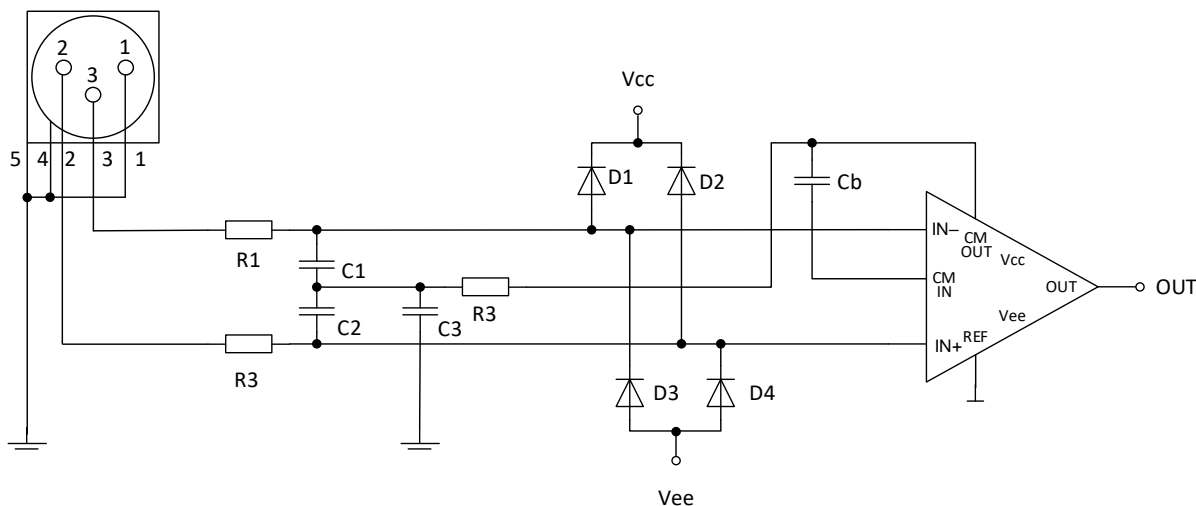
Obrázek 23. Obvod pro změnu vstupní citlivosti - aktivní řešení (vlevo), pasivní řešení (vpravo)

Při testování na nepájivém poli byla však zvolena pasivní varianta (odporový dělič) pro lepší odstup signál šum - SNR. Přehled naměřených hodnot v krajních mezích nastavení přípravku obou dvou variant je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3. Změřené hodnoty SNR variant změny vstupní citlivosti

Nastavené zesílení koncového zesilovače [dB]	Vstupní citlivost [dB]	SNR [dB]
Aktivní řešení		
0	-24	63,49
18	9	98,58
Pasivní řešení		
0	-24	71,87
18	9	102,73

Laboratorní přípravek má být použitelný univerzálně, a to pro vstupní signál symetrický i nesymetrický. Pro splnění tohoto požadavku je vybrán obvod THAT1200. Základní parametry tohoto obvodu jsou: THD ( $V_{in} = 10 \text{ dBu}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $R_L = 2 \Omega$ ) = 0,0005 %,  $SR = 12 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Zapojení obvodu použité v této práci je uvedeno na obrázku 24. Další parametry jsou dohledatelné v technické dokumentaci obvodu uvedeném v seznamu literatury [14].



Obrázek 24. Zapojení obvodu THAT1200

Požadavek na možnost přívodu symetrického i nesymetrického vstupního signálu je řešen pomocí konektoru, do kterého lze připojit jak XLR konektor samec, tak nesymetrický Jack 6,35 mm samec. XLR pak přivádí symetrický vstupní signál. Po připojení Jack konektoru dojde ke zkratování 1. a 3. pinu, tedy na  $IN-$  obvodu je přivedena zem. Takto je splněna podmínka možnosti přivádět jak symetrický, tak nesymetrický vstupní signál.

Odpory  $R1$  až  $R3$  a kondenzátory  $C1$  až  $C3$  slouží jako ochrana před RFI (vysokofrekvenčnímu rušení). Diody  $D1$  až  $D4$  slouží jako ochrana proti ESD (elektrostatickému výboji).

Dál je signál veden na obvod úpravy vstupní citlivosti (velmi přesný odporový dělič), který řazen za THAT1200. Pro přepínání je použit přepínač jednopólový dvanáctipolohový, který zajistí přepínání na všech dvanáct požadovaných hodnot přenosu. Nejdříve byl proveden

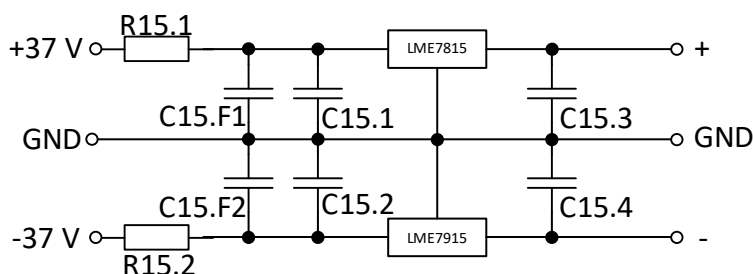
výpočet hodnot potřebných součástek, který byl následně ověřen pomocí simulace. Hodnoty jednotlivých odporů, které budou na DPS realizovány sériovým zapojením tří odporů pro dosažení co nejpřesnější hodnoty je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4. Vypočtené hodnoty odporů v odporovém děliči pro nastavení vstupní citlivosti

Požadovaný přenos [dB]	Použitý odpor [ $\Omega$ ]	Vypočtená hodnota přenosu [dB]
0	0	0,0000
-3	8962,3	-3,0000
-6	6344,7	-6,0000
-9	4491,8	-9,0000
-12	3180	-12,0000
-15	2251,2	-15,0000
-18	1593,8	-18,0001
-21	1128,3	-21,0003
-24	798,7	-24,0001
-27	565,5	-27,0002
-30	400,3	-30,0001
-33	283,4	-33,0000
	687	
Celkový odpor děliče	30687	[ $\Omega$ ]

V tabulce je vidět rozsah požadovaných hodnot přenosu 0 až -33 dB. Požadavek je však +9 až -24 dB. To je způsobeno tím, že odporovým děličem nelze dosáhnout vyšší přenos než 0 dB. Proto hodnota zesílení koncového zesilovače bude nastavena na +9 a +27 dB a tím se posune stupnice vstupní citlivosti o + 9 dB pro splnění požadavku.

THAT1200 je zapotřebí napájet  $\pm 15$  V. Proto je zapotřebí navrhnout zdroj pro tento obvod. Schéma zapojení zdroje pro úrovně napětí  $\pm 15$  V je uvedeno na obrázku 25



Obrázek 25. Zdroj pro obvod THAT1200  $\pm 15$  V

kde  $R15.1 = R15.2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $C15.F1 = C15.F2 = 47 \text{ }\mu\text{F}$  a  $C15.1 = C15.2 = C15.3 = C15.4 = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ .

Posledním řešeným požadavkem je požadavek na možnost otočení fáze každého koncového zesilovače zvlášť. To bude řešeno pomocí DPDT přepínače, řazeného před obvodem THAT1200, kdy jeho přepnutím dojde k prohození přívodu vstupního napětí na vstupní piny obvodu a tím dojde i k otočení fáze o  $180^\circ$ .



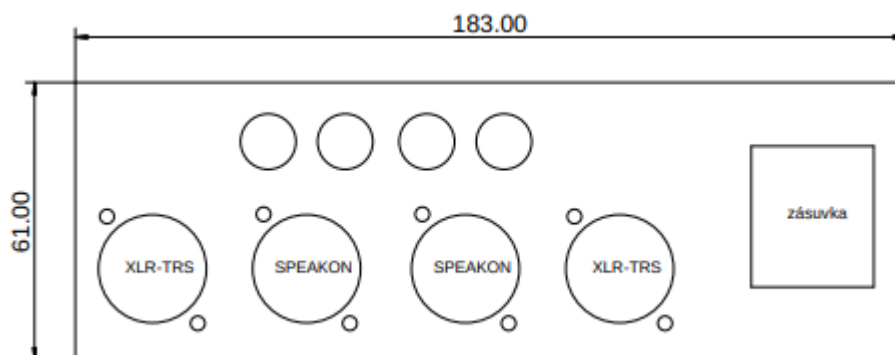
### 3.1.4 Návrh podoby druhé verze koncového zesilovače

Při návrhu podoby modulu koncového zesilovače je potřeba počítat se všemi parametry jako jsou: rozměry transformátoru, rozměry navrhovaných DPS, potřebné konektorové osazení, potřeba chlazení koncového zesilovače, ovládací prvky atd. Z požadavků lze definovat potřebné konektorové osazení budoucí přístrojové skříně.

Pro přívod vstupního signálu bude modul dvojitého koncového zesilovače opatřen dvěma TRS-XLR konektorem pro možnost přivedení symetrického i nesymetrického signálu. XLR pak přivádí symetrický vstupní signál. Po připojení Jack konektoru dojde ke zkratování 1. a 3. pinu, tedy na IN- obvodu je přivedena zem. Takto je splněna podmínka možnosti přivádět jak symetrický, tak nesymetrický vstupní signál.

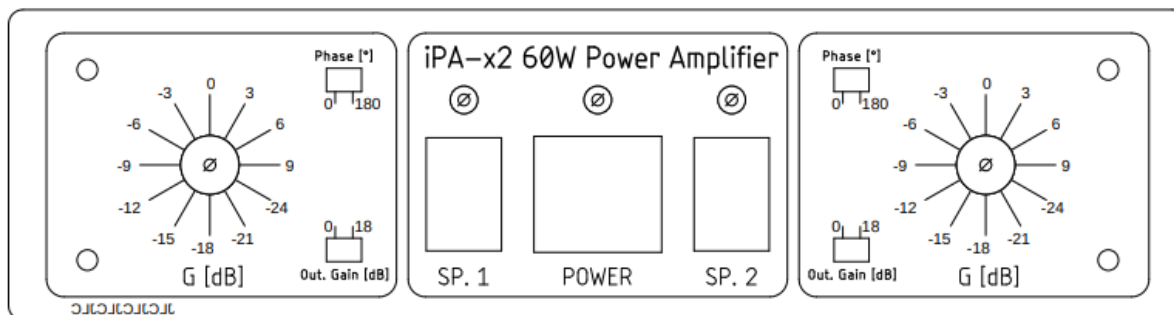
Pro výkonový výstup z koncového zesilovače budou využity dva SPEAKON konektory, kdy jeden bude 4-pinový a druhý 2-pinový. Dále bude možné se připojit na výstup koncového zesilovače pomocí čtyř zdírek pro banánky o průměru 4 mm. Zdíčky pro banánky pak budou připojeny paralelně k 4-pinovému konektoru.

Dalším potřebným konektorem pro modul koncového zesilovače je konektor pro přívod napájecího napětí. Pro tento účel bude využit napájecí konektor, který je již továrně osazen v přístrojové skříně. Uspořádání konektorů na zadní straně přípravku je uvedeno na obrázku 26.



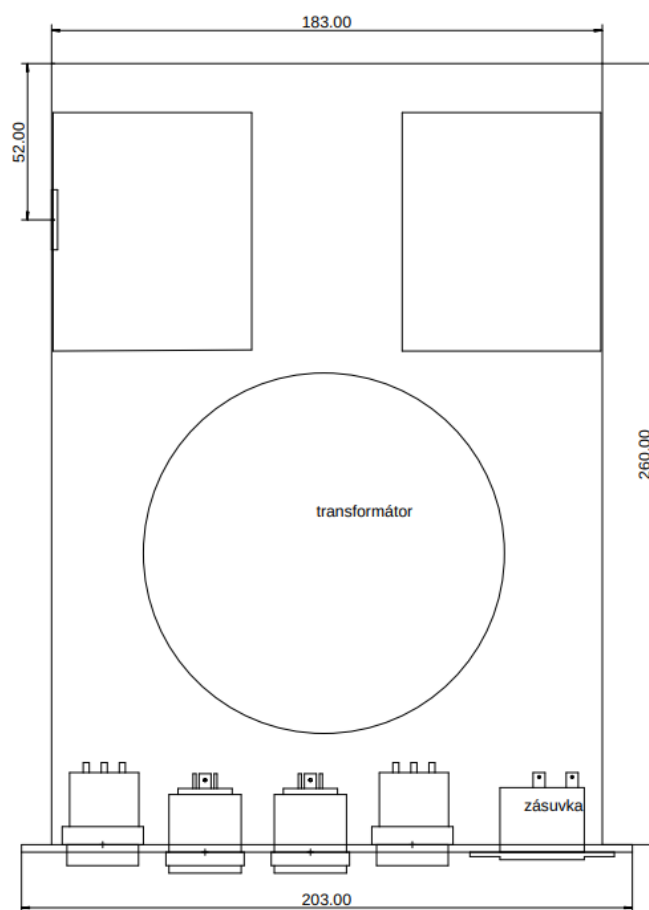
Obrázek 26. Uspořádání konektorů na zadním panelu

V neposlední řadě je zapotřebí modul koncového zesilovače osadit vypínačem, který bude spínat oba dva pracovní vodiče. Dalšími ovládacími prvky budou dva přepínače, které budou převádět obvod ze stavu Mute a zpět, a budou umístěny na přední straně přípravku. Pro přepínání fáze a zesílení koncového zesilovače bude využito dvou DPDT přepínačů situovaných též na přední panel přípravku. Posledními ovládacími prvky budou přepínače jednopólové dvanáctipólové, které zajistí přepínání na všech dvanáct požadovaných hodnot přenosu. Vzhled krycí desky předního panelu přípravku je uveden na obrázku 27.



Obrázek 27. Návrh krycí desky přípravku

Celkové vnitřní uspořádání přípravku je uvedeno na obrázku 28. Zde je uvedena i vzdálenost obvodu LM3886 od okraje skříně. Tato vzdálenost nemůže být příliš malá, aby nedocházelo ke špatnému rozvodu tepla po chladiči.



Obrázek 28. Rozložení prvků modulu druhé verze koncového zesilovače

Při uvažování všech parametrů, byla pro koncový zesilovač vybrána stejná přístrojová skříň jako v první variantě o rozměrech 226,5/271/70 mm (vnitřní rozměry 186,5/260/60 mm). Jelikož je vybrána skříň již s integrovaným chladičem, není zapotřebí zabudovávat chladič další a pro chlazení koncového zesilovače bude využit chladič integrovaný.

## 3.2 Požadavky na moduly zátěží

Pro měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek je zapotřebí dvou modulů zátěží. První modul bude obsahovat normálovou impedanci, která bude sloužit jako bočník a druhý modul bude obsahovat zatěžovací impedanci o hodnotě jmenovité impedance reproduktoru.

Základními požadavky na bočník jsou: impedance  $2 \times 0,1 \, \Omega$  pro možnost připojení dvou kanálů, přesnost odporu do 1 % nebo lepší, příkon  $2 \times 12 \, \text{W}$ .

Základními požadavky na modul zátěží jsou: impedance  $2 \times 6,6 \, \Omega$  pro možnost připojení dvou kanálů, přesnost odporu do 1 % nebo lepší, příkon  $1 \times 15$  a  $1 \times 45 \, \text{W}$ .

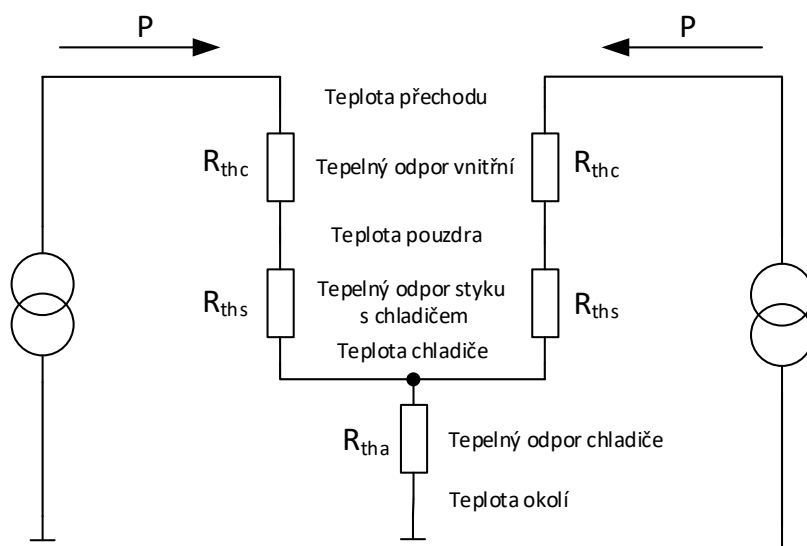
### 3.2.1 Návrh modulu s normálovou impedancí

Pro splnění požadavků na normálovou impedanci byl pro realizaci vybrán rezistor od výrobce ARCOL, konkrétně typ HS25-0R1F. Parametry tohoto odporu jsou: tolerance 1 %, maximální pracovní napětí 550 V, TCR (teplotní koeficient odporu) 100 ppm/°C. Další parametry jsou dohledatelné v technické dokumentaci obvodu uvedeném v seznamu literatury [9].

Dalším požadavkem je maximální teplota přídavného chladiče 60 °C. Základní vztah pro výpočet tepelného odporu chladiče je ve tvaru

$$R_{tha} = \frac{T_j - T_{okolí}}{P} - (R_{ths} + R_{thc}) \quad [\text{K/W}], \quad (3.5)$$

kde  $T_j$  je maximální teplota součástky,  $T_{okolí}$  je teplota okolí,  $P$  je celkový ztrátový výkon,  $R_{ths}$  tepelný odpor styku s chladičem a  $R_{thc}$  vnitřní tepelný odpor součástky.



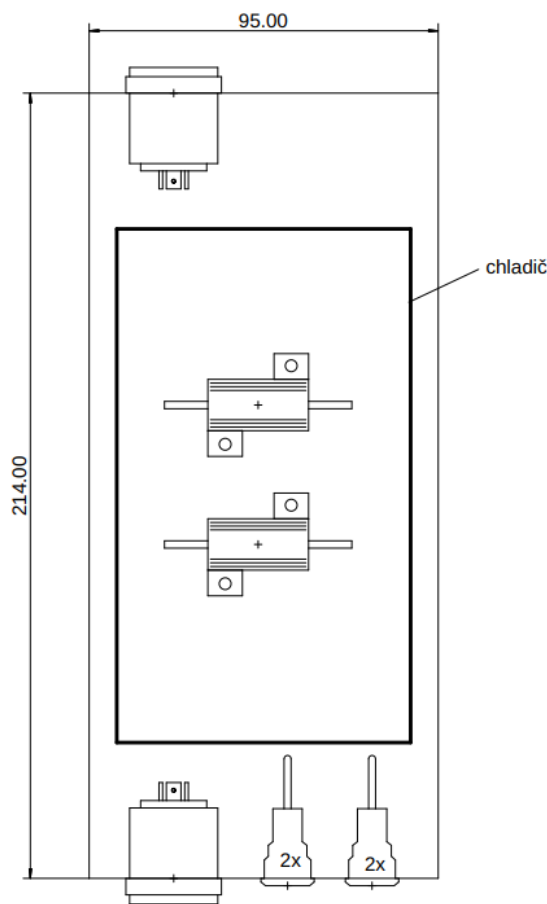
Obrázek 29. Náhradní tepelné schéma pro bočník

Jelikož však na chladič nebude působit pouze jeden zdroj tepla, ale dva (dva odpory), jak je vidět i na náhradním tepelném schématu uvedeném na obrázku 29, je zapotřebí vztah upravit do podoby

$$R_{tha} = \frac{T_j - T_{okolí}}{P} - \frac{(R_{ths} + R_{thc})}{2}. \quad (3.6)$$

Při výpočtu je použita hodnota  $R_{ths}$  pro variantu přímého styku součástky s chladičem s tepelně vodivou pastou (konkrétně 0,1 K/W) a teplota okolí 25 °C. Maximální teplota součástky udávána výrobcem je 200 °C. Pro tuto hodnotu vychází tepelný odpor chladiče na hodnotu 5,14 K/W. Pro reálné použití je však zapotřebí počítat s teplotní rezervou, aby součástka nebyla používána na své maximální teplotě, kdy by mohlo dojít k přehřátí a jejímu zničení. Proto byla pro výpočet uvažována hodnota  $T_j$  rovna 140 °C. Při této hodnotě pak vychází tepelný odpor chladiče na hodnotu 2,64 K/W.

Z požadavků na malé rozměry modulu, rozměrů vybraných součástek, vypočtené hodnoty tepelného odporu chladiče (tomu odpovídající velikosti chladiče) a potřebného konektorového osazení byla vybrána přístrojová skříň o rozměrech 103/220/53 mm (vnitřními rozměry 95/214/49,7 mm). Vybraný chladič je o rozměrech 165/80/35 mm (vybraný chladič je však o něco větší, je však možné ho seříznout na potřebný rozměr). Navržené rozložení jednotlivých prvků modulu bočníku je uvedeno na obrázku 30. Chladič bude při realizaci zapuštěn shora do přístrojové skříně, tak aby vyrobený modul vypadal profesionálně a funkčně byl co nejpřívětivější uživateli. Zapuštěním chladiče dojde sice k snížení účinnosti chladiče, ale to je kompenzováno jeho nižším tepelným odporem, než je požadován z výpočtu.



Obrázek 30. Rozložení prvků modulu bočníku

Pro přívod vstupního signálu bude modul bočníku opatřen 4-pinovým SPEAKON konektorem a dále čtyřmi zdírkami pro banánky o průměru 4 mm. Zdíčky pro banánky pak budou připojeny paralelně k 4-pinovému konektoru, avšak budou připojeny až na samotné

odpory pro snížení parazitních odporů vedení. Pro výstup z modulu bočníku bude využit 4-pinový SPEAKON konektor.

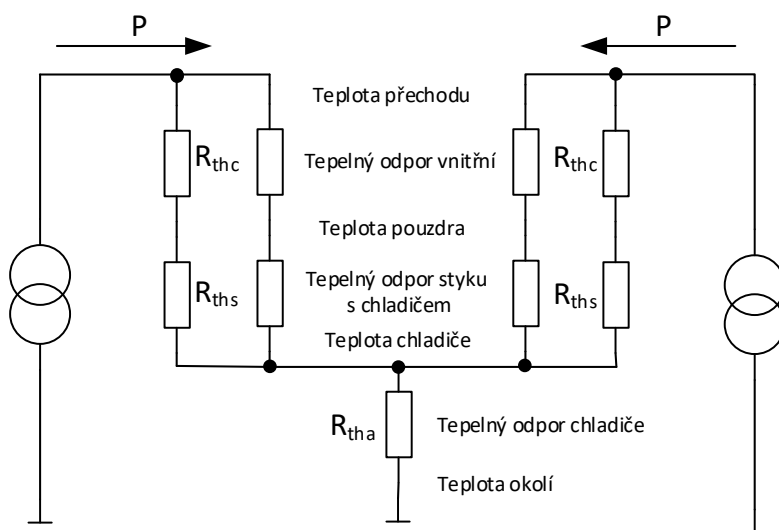
### 3.2.2 Návrh modulu se zatěžovací impedancí

Pro splnění požadavků na zatěžovací impedanci byl pro realizaci vybrán rezistor od výrobce ARCOL, konkrétně typ HS50-3R3F, kdy při realizaci budou řazeny dva tyto odpory do série pro jeden kanál. Parametry tohoto odporu jsou: tolerance 1 %, maximální pracovní napětí 1250 V, TCR (teplotní koeficient odporu) 100 ppm/°C. Další parametry jsou dohledatelné v technické dokumentaci obvodu uvedeném v seznamu literatury [10].

Dalším požadavkem je maximální teplota přídavného chladiče 60 °C. Pro výpočet byl vztah 3.5 upraven podle náhradního tepelného schématu pro zátěž (obrázek 31) do podoby

$$R_{tha} = \frac{T_j - T_{okolí}}{P} - \frac{(R_{ths} + R_{thc})}{4}. \quad (3.7)$$

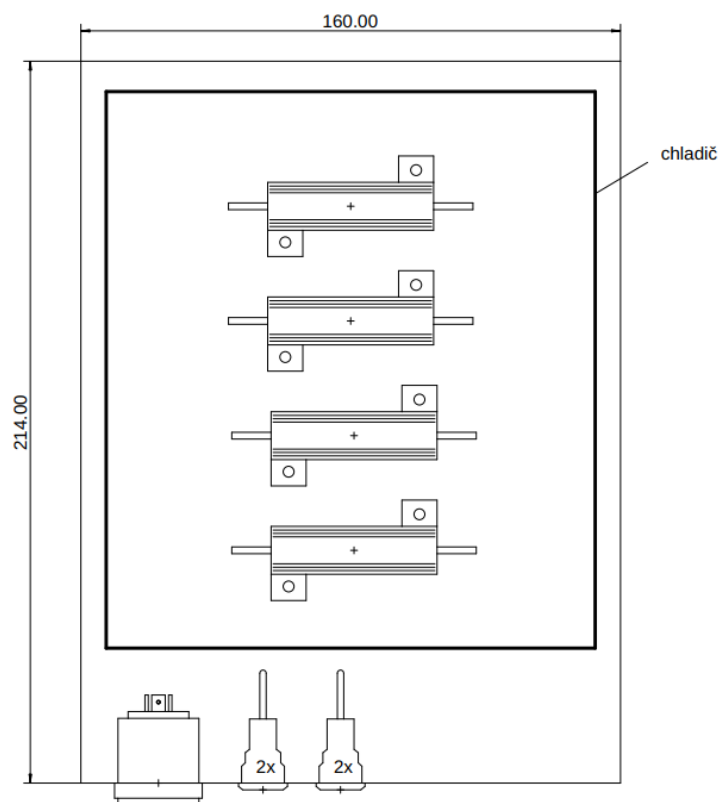
Při výpočtu je použita hodnota  $R_{ths}$  pro variantu přímého styku součástky s chladičem s tepelně vodivou pastou (konkrétně 0,1 K/W) a teplota okolí 25 °C. Maximální teplota součástky udávána výrobcem je 200 °C. Pro tuto hodnotu vychází tepelný odpor chladiče na hodnotu 2,14 K/W. Pro reálné použití je však zapotřebí počítat s teplotní rezervou, aby součástky nebyly používány na své maximální teplotě, kdy by mohlo dojít k přehřátí a jejím zničení. Proto byla pro výpočet uvažována hodnota  $T_j$  rovna 140 °C. Při této hodnotě pak vychází tepelný odpor chladiče na hodnotu 1,14 K/W.



Obrázek 31. Náhradní tepelné schéma pro zátěž

Z požadavků na malé rozměry modulu, rozměrů vybraných součástek, vypočtené hodnoty tepelného odporu chladiče (tomu odpovídající velikosti chladiče) a potřebného konektorového osazení byla vybrána přístrojová skříň o rozměrech 165/220/51 mm (vnitřními rozměry 160/214/47,6 mm). Vybraný chladič je o rozměrech 165/160/35 mm (skutečný vybraný chladič je o něco větší, je však možné ho seříznout na potřebný rozměr). Navržené rozložení jednotlivých prvků modulu zátěže je uvedeno na obrázku 32. Chladič bude při realizaci zapuštěn shora do přístrojové skříně, tak aby vyrobený modul vypadal profesionálně

a funkčně byl co nejpřívětivější uživateli. Zapuštěním chladiče dojde sice k snížení účinnosti chladiče, ale to je kompenzováno jeho nižším tepelným odporem, než je požadován z výpočtu.



Obrázek 32. Rozložení prvků modulu zátěží

Pro přívod vstupního signálu bude modul zátěže opatřen 4-pinovým SPEAKON konektorem a dále čtyřmi zdírkami pro banánky o průměru 4 mm. Zdíčky pro banánky pak budou připojeny paralelně k 4-pinovému konektoru, avšak budou připojeny až na samotné odpory pro snížení parazitních odporů vedení.

## 4. Měření charakteristik pomocí APx500

Navrhované moduly pro měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek budou využívány pro výuku v předmětu BPC-REP. Z vytižitelnosti vybavení, pro jiné úlohy probíhající ve stejný čas, je zapotřebí, aby jak kmitočtová charakteristika, tak i impedanční závislost impedance výhybky šla změřit pomocí jednoho zařízení. Měřicí zařízení, využívané pro tento účel, bude zvukový analyzátor Audio Precision APx515 využívající program APx500.

Program APx500 uživateli poskytuje velké množství různých typů měření. Základní informace o programu APx500 a o měření potřebných charakteristik pomocí tohoto programu, je popsáno v následujících podkapitolách.

### 4.1 Program APx500

Program APx500 je software pro ovládání všech přístrojů řady APx od firmy Audio Precision. Používá se v kombinaci s měřícím přístrojem (v této práci bude dále využíván typ APX-515). Program APx500 dokáže od verze 4.0 pracovat ve dvou režimech, a to Sequence Mode a Bench Mode.

Sequence Mode umožňuje uživateli využívat řadu přednastavených měření. V tomto módu lze předdefinovat měřicí sekvenci a tím proces měření zautomatizovat. Výstup z měření může být exportován do excelové tabulky, nebo formou pdf se shrnutými výstupy z měření.

Bench Mode neobsahuje přednastavená měření jako tomu se u prvního módu. Na druhou stranu obsahuje velké množství nástrojů a nastavení, pro možnost co nejpresnějšího odladění měřicí metody pro měřený přípravek. Díky velkým možnostem zde lze změřit téměř všechny parametry, které by uživatel mohl požadovat [11].

Tato práce bude dále využívat sekvenční mód měření. Tento mód je zvolen pro svoji uživatelskou přívětivost a pro možnost přednastavení projektu a zautomatizování měření.

### 4.2 Měření kmitočtové charakteristiky v programu APx500

Pro měření modulových a fázových kmitočtových charakteristik jsou na výběr v programu APx500 dva typy měření. Jsou to měření typu Continuous Sweep a Acoustic Response. Tyto typy měření neumožňují přímé měření modulové kmitočtové charakteristiky, jsou schopny měřit pouze kmitočtovou závislost úrovně efektivní hodnoty (RMS) měřeného signálu. Modulovou kmitočtovou charakteristiku je v tomto případě nutné získat až následnou úpravou, normalizací úrovně efektivní hodnoty měřeného signálu vzhledem k velikosti budicího signálu. Z tohoto důvodu je pro získání modulové kmitočtové charakteristiky měřeného systému vždy nutné uvádět také velikost budicího signálu ve všech měřeních Acoustic Response [11].

Typ měření Acoustic Response nedokáže změřit přesně charakteristiky na nižších kmitočtech, zejména pod 200 Hz. V této oblasti dochází ke zvlnění naměřených charakteristik a naměřená data nejsou zcela přesná. Tento jev se dá potlačit pomocí nastavení průměrování více měření při samotné analýze (*Analyzer - Averages*). Pro možnost tohoto nastavení je vybrán pro měření v této práci tento typ měření.

Měření typu Acoustic Response je založeno na nepřetržitém logaritmickém rozmítání generovaného harmonického signálu, kdy lze nastavit čas trvání rozmítání (*Durations - Sweep*)

a následně analýze signálu změřeného. Měření typu Acoustic Response je primárně navrženo pro testování reproduktorů pomocí zvukového analyzátoru Audio Precision, ale pro jeho rozšířenou možnost průměrování může být tento typ měření využit i pro základní měření připojeného systému [3].

V okně měření Acoustic Response lze nastavit několik parametrů. Tyto parametry jsou rozděleny do kategorií *Generator*, *Analyzer* a *Nesting*. V kategorii *Generator* lze nastavit:

- kmitočtový rozsah generovaného signálu od 2 Hz až do 80,1 kHz (*Frequency - Start, Stop*),
- úroveň generovaného signálu až do 8 Vrms a jeho DC složku v závislosti na jeho úrovni (*Levels - Sweep, DC Offset*),
- ekvalizaci generovaného signálu definováním křivky v okně *Edit EQ Table* po rozbalení záložky *EQ*,
- dobu trvání rozmítání (*Durations - Sweep*) pro dosažení lepšího rozlišení a odstupu signálu od šumu,
- dobu rozmítání signálu pod počátečním kmitočtem měření (*Durations - Pre-Sweep*) pro možnost lepší stabilizace měřeného zařízení.

Součet časů *Sweep* a *Pre-Sweep* udává celkový čas měření. V kategorii *Analyzer* lze nastavit:

- čas sběru dat analyzátozem (*Signal Processing - Extend Acquisition*), z kterých vypočítává naměřené hodnoty,
- počet měření, které jsou následně průměrovány (*Signal Processing - Averages*), čímž dojde k odstranění nekorelujících dat z výsledků měření.

Pod těmito kategoriemi je umístěno tlačítko *Mic Cal / dBSPL....*. Toto tlačítko otevře kalibraci/nastavení mikrofونů pro jednotlivé kanály. V kategorii *Nesting* lze nastavit: druhý parametr rozmítání generovaného signálu, kterým se ovlivní signál primární (*Secondary Source*). Posledním tlačítkem *Advanced Settings* lze nastavit úroveň výstupů.

Funkce *Smooth* (vyhlazení) vychází z algoritmu v kmitočtové doméně, kdy data prochází pásmovými filtry se stejnou šířkou pásma. Šířka pásma filtru se dá nastavit v rozmezí od 1/24 oktávy do 1 oktávy [3].

### 4.3 Měření kmitočtové závislosti impedance v programu APx500

Program APx500 ve své nabídce předdefinovaných měření nemá možnost měření kmitočtové závislosti impedance. Jak plyne z požadavků, je zapotřebí tento problém vyřešit, neboť při výuce nebude možné využívat dalšího zařízení.

Řešením je samotná metoda měření, a to metoda měření napětí a proudu protékajícího zátěží, kdy je hodnota proudu měřena jako napětí na známém normálovém odporu s nízkou hodnotou zapojeném do série s měřenou zátěží.

Při definovaném budícím napětí, známé hodnotě impedance normálového odporu a změřeném úbytku napětí na normálovém odporu, lze pak dopočítat kmitočtovou závislost impedance měřené zátěže.

Pro měření kmitočtové závislosti impedance lze tedy použít stejný typ měření jako při měření kmitočtové charakteristiky, jen bude následovat jiný postup zpracování naměřených dat.

V prostředí APx je měření realizováno za pomoci výchozího typu měření s názvem *Frequency response*. Součástí tohoto výchozího měření je změřena závislost efektivní hodnoty napětí na kmitočtu snímaného oběma kanály při buzení signálem typu *sine sweep (RMS Level)*.



Pro získání kmitočtové závislosti impedance lze tedy provést měření v následujících krocích. Použít pro měření úbytku napětí na bočníku kanál 1 a pro měření napětí na zátěži kanál 2. Dále provést dílčí výpočet pomocí programu APx500 označený *Compare (ratio)*. Pro měření impedance je nutné tento odvozený výsledek v prostředí APx nastavit tak, aby zobrazoval podíl kanálu 2 a kanálu 1 pro měření se stejným pořadovým číslem. Hodnoty na ose Y v tuto chvíli odpovídají desetinásobku impedance zátěže.

Pro přímé zobrazení kmitočtové závislosti impedance v prostředí APx je nutné vytvořit další výpočet (dílčí výsledek) označený jako *Offset*, který nám umožní upravit hodnoty na ose Y tak, aby přímo odpovídaly impedanci. Hodnoty na ose Y je tedy nutné vynásobit hodnotou odporu použitého bočníku. Po provedené korekci lze definovat popis osy Y jako absolutní hodnotu impedance s jednotkou Ohm.

## 5. Realizace přípravku

V této kapitole je popsán postup realizace navržených modulů pro měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek. Jelikož se přípravky budou používat i samostatně, jejich návrh byl proveden tak, že jednotlivé části potřebné pro měření byly navrženy jako samostatné moduly.

V následujících podkapitolách je rozebrán postup návrhu DPS pro koncový zesilovač a popsán postup sestavování jednotlivých modulů

### 5.1 Návrh DPS

Návrh DPS byl proveden pomocí programu EAGLE 9.5.0. Jelikož v průběhu práce vznikly některé komplikace a zároveň byly vzneseny nové požadavky na navrhovaný koncový zesilovač, byl celý koncept řešení koncového zesilovače znovu navržen a před samotným návrhem nové sady DPS ověřena jeho funkce na nepájivém poli.

V následujících podkapitolách je popsán návrh DPS dvou variant řešení koncového zesilovače.

#### 5.1.1 První verze koncového zesilovače

Při návrhu byl brán v potaz doporučený návrh DPS pro obvod LM4780 uvedený v technické dokumentaci obvodu [6]. Pro větší komplexnost obvodu umístěného na této desce byl však návrh přepracován dle potřeb splňující požadavky. Při návrhu byl kladen důraz na dodržení návrhových pravidel a dostatečných tloušťek vodivých cest pro požadovaný výkon. Dále pak bylo hleděno na symetričnost návrhu a rozložení součástek pro co nejefektivnější využití desky a zajištění funkčnosti.

Navržená DPS je uvedena v příloze A. Zde je uveden návrh desky, která na sobě nese funkční zhotovení navrhovaného obvodu.

#### 5.1.2 Druhá verze koncového zesilovače

Na druhou verzi modulu koncového zesilovače byly kladeny větší nároky než na první verzi. Pro ověření správného návrhu a funkčnosti bylo celé zapojení před návrhem DPS ověřeno a proměřeno na nepájivém poli. Z měření byla definována podoba jednotlivých částí jako je například pasivní dělič pro změnu vstupní citlivosti a s tím spojené zesílení koncového zesilovače.

Při Návrhu DPS byl samozřejmě brán důraz na samotnou podobu navrhovaného modulu a rozmístění jednotlivých komponent v přístrojové skříni. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto rozdělit celý obvod na dvě DPS, kdy na jedné bude umístěn obvod koncového zesilovače společně se všemi pomocnými obvody (komparátor, zdroje, obvod s relé apod) a na druhé DPS bude umístěn obvod s THAT1200 společně s přepínačem vstupní citlivosti. Tyto DPS budou následně spojeny pájením. Deska s THAT1200 bude zároveň umístěna tak, aby všechny přepínače, které bude obsahovat byly směřovány na přední panel přípravku.

Navržené DPS jsou uvedeny v příloze A. Návrh DPS proběhl dvakrát pro každý kanál zesilovače zvlášť. Dvojí návrh byl nutný zejména z důvodu umístění obvodu LM3886 na

opačnou stranu přístrojové skříně a zároveň také z důvodu umístění ovládacích prvků na předním panelu.

## 5.2 Sestavení částí přípravku

Přípravek pro měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek byl navržen jako tři samostatné moduly. Každý modul se skládá z několika komponent jako: přístrojová skříň, DPS, funkční součástky, chladič, konektory, .... Při sestavování je tedy zapotřebí většinu komponent nějak upravit, aby vše pasovalo podle návrhu.

V následujících podkapitolách je popsán postup sestavování jednotlivých modulů.

### 5.2.1 Sestavení první verze koncového zesilovače

Hlavní částí koncového zesilovače je DPS s potřebnými obvody. Tato DPS obsahuje čip LM4780, který potřebuje přídavný chladič pro svoji bezproblémovou funkci. Vybraná přístrojová skříň disponuje integrovanými chladiči, tedy při montáži bude využit jeden z nich.

Do zadního panelu bude vyříznut otvor pro euro konektor pro přivedení síťového napětí a také otvor pro pojistkové pouzdro.

DPS koncového zesilovače bude upevněna ke chladiči pomocí L profilů, které budou připevněny přímo ke chladiči. V DPS koncového zesilovače jsou navrženy montážní otvory pro šrouby M3.

Transformátor bude uchycen ve středu přípravku. V předním panelu budou vyřezány otvory pro potřebné konektory, které budou následně do panelu vsazeny. Posléze proběhne propojení všech prvků koncového zesilovače příslušnými vodiči. Soupis propojovací kabeláže a jejich konektorů je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5. Soupis kabeláže k propojení všech částí první verze koncového zesilovače

1 konec kabelu		2 konec kabelu	
připojeno k	konektor	připojeno k	konektor
Síťová zásuvka	1x faston 6,3 mm	Pojistkové pouzdro	1x faston 6,3 mm
Síťová zásuvka	1x faston 6,3 mm	Vypínač	1x faston 4,8 mm
Pojistkové pouzdro	1x faston 6,3 mm	Vypínač	1x faston 4,8 mm
Transformátor	pájením	Vypínač	2x faston 4,8 mm
Transformátor	pájením	Koncový zesilovač	3x faston 6,3 mm
Koncový zesilovač	JST - 2 pin samec	Vstupní konektory	pájením
Koncový zesilovač	2x faston 6,3 mm	Výstupní konektor	2x faston 4,8 mm

Připojení vstupních konektorů je upraveno podle potřeb k propojení všech požadovaných konektorů pro možnost přívodu vstupního signálu.

### 5.2.2 Sestavení druhé verze koncového zesilovače

Hlavní částí druhé verze jsou dvě sestavy DPS s potřebnými obvody pro správnou funkci celého přípravku a pro splnění všech požadavků, které jsou na tento přípravek kladeny. DPS lze rozdělit na dvě skupiny a to: DPS nesoucí obvod koncového zesilovače s čipem LM3886, který potřebuje přídavný chladič pro svoji bezproblémovou funkci a DPS nejsoucí obvod pro úpravu

vstupního (symetrického/nesymetrického) signálu a změnu vstupní citlivosti. Tyto dvě desky budou spolu spojeny pájením.

Přední panel přípravku je navržen jako samostatná krycí deska, která bude vsazena do vyfrézovaného hliníkového panelu zamýšlené přístrojové skříně. Na této desce jsou umístěny popisky pro intuitivní ovládání celého přípravku a také obsahuje veškeré přepínače.

Do zadního panelu budou vyfrézovány otvory pro umístění všech konektorů potřebných pro připojení ke koncovému zesilovači. Rozmístění konektorů je vidět na obrázku 26.

DPS koncového zesilovače budou upevněny ke chladičům pomocí L profilů, které budou připevněny přímo ke chladiči. V DPS koncového zesilovače jsou navrženy montážní otvory pro šrouby M3.

Transformátor bude uchycen ve středu přípravku. Posléze proběhne propojení všech prvků koncového zesilovače příslušnými vodiči. Soupis propojovací kabeláže a jejich konektorů je uveden v tabulce 6.

Tabulka 6. Soupis kabelů k propojení všech částí druhé verze koncového zesilovače

1 konec kabelu		2 konec kabelu	
připojeno k	konektor	připojeno k	konektor
Síťová zásuvka	2x faston 6,3 mm	Vypínač	2x faston 6,3 mm
Transformátor	pájením	Vypínač	2x faston 4,8 mm
Transformátor	pájením	Koncový zesilovač 1 a 2	6x faston 6,3 mm
Koncový zesilovač 1	JST - 2 pin samec	Přepínač Mute	2x faston 4,8 mm
Koncový zesilovač 1	JST - 4 pin samec	2x led signalizační dioda	pájením
Koncový zesilovač 1	2x faston 6,3 mm	SPEAKON konektor 4-pin	2x faston 4,8 mm
		2x zdířka pro banánek 4mm	pájením
Koncový zesilovač 2	JST - 2 pin samec	Přepínač Mute	2x faston 4,8 mm
Koncový zesilovač 2	JST - 4 pin samec	led signalizační dioda	pájením
Koncový zesilovač 2	2x faston 6,3 mm	SPEAKON konektor 4-pin	2x faston 4,8 mm
		SPEAKON konektor 2-pin	2x faston 4,8 mm
		2x zdířka pro banánek 4mm	pájením

SPEAKON konektory jsou pro větší univerzálnost doplněny zdířkami pro banánky o průměru 4 mm, které jsou umístěny nad odpovídající SPEAKON konektory a jsou k nim připojeny paralelně.



Obrázek 33. Podoba vybrané přístrojové skříně pro koncový zesilovač

Na obrázku 33 je vidět podoba vybrané přístrojové skříně pro kompletaci koncového zesilovače. Z důvodů vzniku nových nároků na koncový zesilovač a zároveň v souvislosti s nečekanou nedostupností čipu LM4780, který byl uvažován při návrhu a realizaci první verze koncového zesilovače, nebyla v zbylých časových možnostech této práce zrealizována druhá verze koncového zesilovače.

### 5.2.3 Sestavení modulů zátěží

Hlavními prvky v modulech zátěží jsou výkonové rezistory. Pro správnou funkci a možnost přívodu vstupního signálu o požadované úrovni, je zapotřebí použít u odporů přídavný chladič. Výběr chladiče byl proveden tak, aby při krátkém užívání měl dostatečnou tepelnou kapacitu (tloušťka základny chladiče) avšak při použití v delším časovém intervalu zvládal odvádět teplo (větší množství finů a menší šířce - větší plocha chladiče a tím i přenos tepla mezi chladičem a vzduchem). Pro tento účel byl vybrán lisovaný chladič o rozměrech 1000/165/35 mm, z kterého budou uříznuty chladiče o požadovaných velikostech.

Přístrojové skříně pro moduly zátěží byly vybírány s ohledem na co možná nejmenší velikost, avšak aby se do nich dal zabudovat chladič o potřebné velikosti. Chladič bude do přístrojové skříně zapuštěn z horní strany. Bude tedy potřeba vyjmout a upravit horní výsuvné víko vybraných přístrojových skříní na požadované rozměry a tvar. Chladič pak bude opatřen L profilem, který lze zasunout do lišt umístěných na stěnách přístrojové skříně. Než bude však chladič vsunut připevněn na své místo, nejdříve v něm budou připraveny závity o průměru M3 pro připevnění odpovídajících rezistorů, které budou ke chladiči připevněny za použití tepelně vodivé pasty.

Do přední (u bočnicku i zadního) panelu budou vyříznuty otvory pro montáž požadovaných konektorů, které budou následně do panelu vsazeny. Posléze proběhne propojení všech prvků modulů zátěží příslušnými vodiči. Soupis propojovací kabeláže a jejich konektorů pro bočník je uveden v tabulce 7 a pro zátěž je uveden v tabulce 8.

Tabulka 7. Soupis kabeláže k propojení všech částí bočnicku

1 konec kabelu		2 konec kabelu	
připojeno k	konektor	připojeno k	konektor
Rezistor (1. kanál)	pájením	Vstupní konektory	1x faston 4,8 mm, pájením
Rezistor (1. kanál)	pájením	Výstupní konektor	1x faston 4,8 mm
Rezistor (2. kanál)	pájením	Vstupní konektory	1x faston 4,8 mm, pájením
Rezistor (2. kanál)	pájením	Výstupní konektor	1x faston 4,8 mm
Vstupní konektor	2x faston 4,8 mm	Výstupní konektor	2x faston 4,8 mm

Připojení vstupních konektorů bočnicku je upraveno podle potřeb k propojení všech požadovaných konektorů pro možnost přívodu vstupního signálu. Vodiče od všech vstupních konektorů jsou vedeny co nejbližší k rezistory, pro minimalizaci parazitních odporů vedení.

Tabulka 8. Soupis kabeláže k propojení všech částí zátěže

1 konec kabelu		2 konec kabelu	
připojeno k	konektor	připojeno k	konektor
Rezistory (1. kanál)	pájením	Vstupní konektory	2x faston 4,8 mm, pájením
Rezistory (2. kanál)	pájením	Vstupní konektory	2x faston 4,8 mm, pájením

Připojení vstupních konektorů zátěže je upraveno podle potřeb k propojení všech požadovaných konektorů pro možnost přívodu vstupního signálu. Vodiče od všech vstupních konektorů jsou vedeny co nejbližší k rezistory, pro minimalizaci parazitních odporů vedení.

Realizace vnitřního zapojení samostatných modulů zátěží jsou uvedeny na obrázcích 34 a 35.



Obrázek 34. Vzhled vnitřního zapojení bočnicku



Obrázek 35. Vzhled vnitřního zapojení zátěže

Podoba realizovaných modulů je pak uvedena v příloze C. Z výše uvedených obrázků je vidět, že byly splněny požadavky na velikost modulů a zároveň byla provedena funkční realizace.

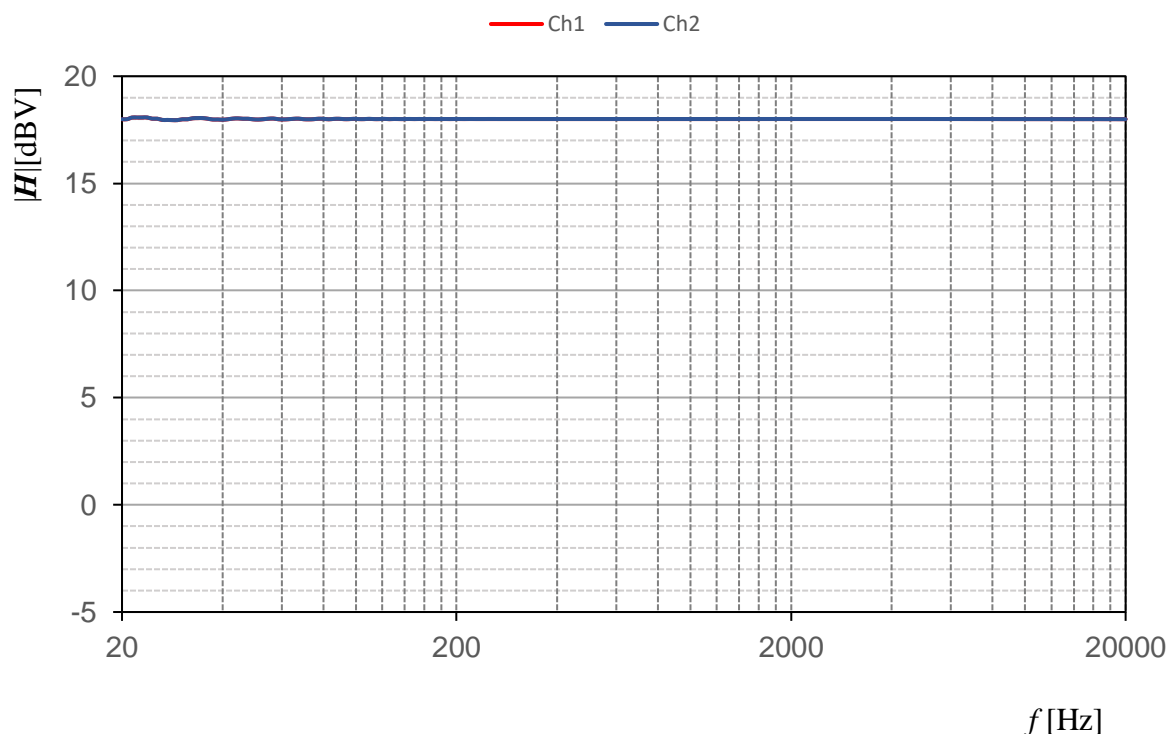
## 6. Měření a optimalizace

V tomto kroku konstrukce je čas na měření zhotovených modulů pro ověření navržených parametrů a funkčnosti modulů. Tyto měření jsou následně vyhodnoceny. Oživení a měření modulů proběhlo pomocí zvukového analyzátoru Audio Precision APX-515. Měření bylo provedeno v programu APx500.

### 6.1 Měření první verze koncového zesilovače

Měření parametrů koncového zesilovače proběhlo jak analýzou zvukovým analyzátozem APX-515, kde byla měřena modulová kmitočtová charakteristika, tak i poslechem pro zjištění šumu a brumu.

Při prvním měření bylo zjištěno nepřesné nastavení zesílení koncového zesilovače a to: kanál 1 = 17,42 dB, kanál 2 = 17,47 dB. Zároveň byl sledován mírný pokles na vyšších kmitočtech (cca o 0,5 dB). Z tohoto důvodu byla provedena optimalizace pro docílení přesné požadované hodnoty zesílení 18 dB. Na obrázku 36 je uvedena modulová kmitočtová charakteristika koncového zesilovače po kalibraci.



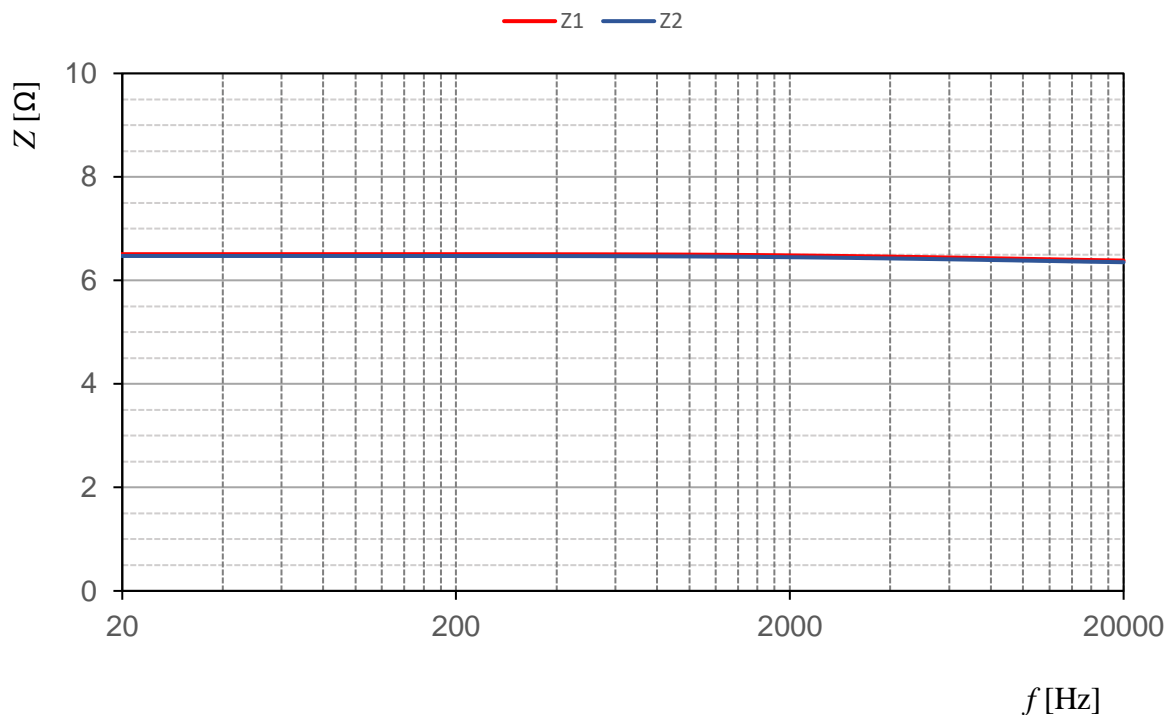
Obrázek 36. modulová kmitočtová charakteristika první verze koncového zesilovače

Po optimalizaci bylo docíleno zesílení koncového zesilovače o hodnotách: kanál 1 = 18,003 dB, kanál 2 = 18,001 dB. Takto nastavené hodnoty zesílení již splňují požadavky na koncový zesilovač.



## 6.2 Měření modulů zátěží

Pro ověření funkčnosti modulů zátěží bylo provedeno měření na principu popsáném v kapitole 2.2. Výstupem tohoto měření je kmitočtová závislost impedance uvedená na obrázku 37.



Obrázek 37. Kmitočtová závislost impedance modulu zátěže

Z naměřené charakteristiky je vidět, že přes celé měřené kmitočtové pásmo, v kterém bude zátěž používána, je hodnota impedance téměř konstantní, s minimálním poklesem na vyšších kmitočtech. Hodnota změřené impedance pomocí zrealizovaného bočníku v této práci je: kanál 1 = 6,51  $\Omega$ , kanál 2 = 6,48  $\Omega$ . Tyto hodnoty jsou o něco nižší než hodnoty navržené, ale to pro používání zátěže pro uvažovaná měření je nepodstatné.

## 7. Příprava teoretické části laboratorní úlohy

V zadání práce je požadavek na vytvoření laboratorní úlohy na zadané téma. Tato laboratorní úloha by měla být vyučována v předmětu BPC-REP. V této práci je sepsán teoretický návod laboratorní úloha na téma: Měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek a kompenzačních obvodů. Bude se jednat o laboratorní úlohu využívající navržené moduly v této práci. Studenti by po absolvování této úlohy měli být schopni říct, jakou funkci mají použité kompenzační obvody v pasivní kmitočtové výhybce, jaký vliv mají na průchozí signál a kdy je vhodné použít jaký kompenzační obvod při realizaci výhybky.

Postup práce zadané laboratorní úlohy není součástí této DP práce. Pracovní postup je součástí bakalářské práce, která je zhotovována ve stejném akademickém roce jako tato diplomová práce, a proto pracovní postup nebude ani v této práci uveden.

### 7.1 Požadavky na laboratorní úlohy

Laboratorní úloha číslo tři, předmětu BPC-REP, se zabývá měřením charakteristik pasivních kmitočtových výhybek a kompenzačních obvodů. Studentům bude představen modulární přípravek pasivní výhybky, s kterým budou pracovat a zároveň měřící moduly, pomocí kterých budou měřit požadované charakteristiky. Měření bude provedeno pomocí programu APx500, kde jsou připraveny sekvence měření pro každý bod zadání. Pomocí těchto sekvencí studenti naměří všechny požadované charakteristiky, zároveň bude proveden export do excelových souborů. Následně studenti nahrají exportovaná data do předem připraveného výstupního protokolu, kde proběhne automatická úprava dat, zapsání a naformátování dat do připravených tabulek a vykreslení potřebných grafických závislostí.

Soupis zadaných úkolů pro tuto laboratorní úlohu je uveden níže.

- 1) Proved'te kalibrační měření celého měřeného řetězce s propojkami (bez kompenzačních obvodů). Všechny závislosti vyexportujte a nainportujte do výstupního protokolu.
- 2) Změřte kmitočtové závislosti impedance obvodů, které slouží pro kompenzaci impedančních charakteristik reproduktorů Monacor SPH-170 a Monacor DT-25N. K modulární pasivní výhybce následně připojte reproduktorovou soustavu OM3, která je těmito reproduktory osazena. Znovu změřte kmitočtovou závislost impedance, tentokrát kompenzačních obvodů, které jsou zatíženy těmito reproduktory. Všechny závislosti vyexportujte a nainportujte do výstupního protokolu. Odpojte soustavu OM3, všechna následující měření v bodech 2 až 4 se provádí při zatížení pouze reálnou zátěží 6,6 Ohmu.
- 3) Změřte kmitočtovou charakteristiku samotné výhybky složenou z kmitočtových filtrů 2. řádu dle Linkwitz-Riley aproximace s nastavením vhodným pro ozvučnici OM2. Všechny závislosti vyexportujte a nainportujte do výstupního protokolu.
- 4) Změřte kmitočtovou charakteristiku obvodu HSF pro kompenzaci akustického zkratu na nízkých kmitočtech pro reproduktor SPH-170, která je nastavena pro ozvučnici OM2. Pak přidejte obvod ARPF pro kompenzaci rezonance téhož reproduktoru v okolí 4 kHz a měření proved'te znovu. Všechny závislosti vyexportujte a nainportujte do výstupního protokolu.
- 5) Změřte kmitočtovou charakteristiku obvodu RPF se zařazeným předřadným odporem pro kompenzaci úzkého útlumu v kmitočtové charakteristice reproduktoru DT-25N v ozvučnici OM2. Následně připojte i obvod ARPF, který kompenzuje nárůst citlivosti

reproduktoru DT-25N na kmitočtech nad 15 kHz. Všechny závislosti vyexportujte a nainportujte do výstupního protokolu.

- 6) Osad'te veškeré obvody kmitočtové výhybky kromě obvodů kompenzace impedančních charakteristik reproduktorů a změřte kmitočtové charakteristiky každého z jejich výstupů s reálnou zátěží 6,6 Ohmu. Následně připojte obvody kompenzace impedančních charakteristik reproduktorů, připojte reproduktorovou soustavou OM3 a proveďte měření znovu. Všechny závislosti vyexportujte a nainportujte do výstupního protokolu.
- 7) Změřte kmitočtovou závislost impedance celé kmitočtové výhybky zatížené reproduktorovou soustavou OM3.
- 8) Změřte proud protékající konkrétními rezistory ve výhybce skrze měření napětí na nich, upřesní se až pro provedení testovacích měření.

K těmto úkolům je sepsán teoretický úvod, který studenti nastudují před začátkem měření. Měření bude provedeno pomocí zvukového analyzátoru Audio Precision, do kterého studenti nahrají předem připravený projekt s nastavenými sekvencemi pro měření. Pro laboratorní úlohu je také vytvořen výstupní protokol v excelu, který využívá makra. Tato makra obsahují funkci importu, zpracování dat do potřebné podoby, jejich vepsání do připravených tabulek a zobrazení odpovídající modulové a fázové kmitočtové charakteristiky, případně Impedanční kmitočtové charakteristiky.

Text laboratorní úlohy, vyplněný i prázdný výstupní protokol a naměřená data jsou uvedeny v elektronické příloze této práce. Příložený návod laboratorní úlohy v tištěné podobě k diplomové práci nebylo vyžadováno vedoucím práce.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo přiblížit problematiku měření jednotlivých charakteristik kmitočtových výhybek pro reproduktorové soustavy. Pro její přiblížení byly zpracovány kapitoly, které pojednávají o měřených charakteristikách a o principu jejich měření.

V této práci jsou navrženy konstrukční řešení požadovaných modulů pro měření. Dále je navržena DPS koncového zesilovače, která je vyrobena a osazena. Tato DPS nenese pouze obvod koncového zesilovače, ale také obvody pomocné, které zajišťují správnou funkci a dovolují univerzálnější použití koncového zesilovače.

Pro modul bočníku a zatěžovací impedance byly vypočteny tepelné odpory přidavných chladičů. Při návrhu konstrukčního řešení bylo vybráno řešení zapustit chladič z horní strany do přístrojové skříně i za cenu snížení účinnosti chladičů. Toto řešení bylo vybráno pro možnost větší plochy chladiče při použití menších rozměrů přístrojové skříně. Dále pak kvůli funkčnosti a vzhledu navrhovaného zařízení. Výběr přístrojové skříně byl zdlouhový z důvodu požadavku na malé pořizovací náklady (tedy ne výroba na zakázku) a z důvodu komplexního řešení se zabudováním chladiče do skříně, kdy chladič musel splňovat požadavky na tepelný odpor. S kombinací požadavku na malé rozměry byl tedy návrh časově náročnější.

Následně byly všechny navrhované moduly realizovány a byla ověřena jejich funkce. Byly proměřeny jejich parametry a pro snížení odchylky od očekávaných hodnot byla provedena optimalizace za účelem nastavení přesných hodnot.

Při realizaci koncového zesilovače (jejíž postup je popsán v kapitole 5.1) však vznikl jeden závažný problém (nedostupnost obvodu LM4780 uvažovaného v návrhu) a dále i další požadavky, které vedly ke změně celého návrhu. Z těchto důvodů bylo od realizace navrženého koncového zesilovače odstoupeno a proběhl nový návrh řešení koncového zesilovače, který je popsán v kapitole 3.1.3.

Zmíněným závažným problémem je, že při ožiování druhého kusu koncového zesilovače došlo i přes důkladné proměřování parametrů a ověřování funkčnosti celého zapojení ke zničení integrovaného obvodu LM4780. K dispozici byly ještě dva náhradní obvody, kdy však při ožiování bylo zjištěno, že jeden z obvodů je vadný (při přivedení signálu na vstup byla na osciloskopu naměřena stejnosměrná složka o hodnotě  $V_{CC}/2$ ). Při realizaci bylo dále zjištěno, že obvod LM4780 se přestal vyrábět a není již nikde klasickou distribuční cestou k sehnání. Druhý náhradní čip byl tedy ponechán jako rezervní, pro přípravku mAPC-X2, kde je tento obvod využíván.

Do nového návrhu koncového zesilovače byly zapracovány nové požadavky vzniklé v průběhu práce a to: změna vstupní citlivosti v rozmezí +9 dB až -24 dB s krokem 3 dB, možnost změny zesílení koncového zesilovače mezi hodnotami 0 a 18 dB, možnost otočení fáze. Z důvodů vzniku nových požadavků na koncový zesilovač a zároveň v souvislosti s nečekanou nedostupností čipu LM4780, který byl uvažován při návrhu a realizaci první verze koncového zesilovače, nebyla v zbylých časových možnostech této práce zrealizována druhá verze koncového zesilovače.

V práci je zpracována teoretická část laboratorní úlohy: Měření charakteristik pasivních kmitočtových výhybek a kompenzačních obvodů. Zde byly popsány základní vlastnosti měřených charakteristik a také základní principy jejich měření. V této úloze si studenti vyzkouší

vliv filtračních a kompenzačních obvodů na průchozí signál. Pro úlohu byl kromě návodu vypracován výstupní protokol v excelu, který pracuje s makry pro ulehčení práce studentů.

V průběhu práce vznikly nové požadavky na zadané parametry navrhovaného koncového zesilovače. Díky tomu a nedostupnosti čipu LM4780 bylo nutné provést nový návrh koncového zesilovače, kdy funkce jednotlivých obvodů byla otestována na nepájivém poli pro dosažení nejlepších parametrů. V tuto chvíli jsou tedy zhotoveny dva ze tří přípravků, které jsou plně funkční. Pro třetí přípravek (koncový zesilovač) jsou navrženy nové desky a je vymyšleno konstrukční řešení celého modulu. V práci by se tedy dále mělo postupovat osazením vyrobených DPS, oživením, optimalizací a proměřením nové verze koncového zesilovače pro finalizaci sady modulů pro měření pasivních kmitočtových výhybek.

# Literatura

- [1] TOMAN, Kamil. Reprodukory a reprosoustavy II. Orlová: Česko: s.n., 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.
- [2] HOLÍNSKÝ, Jan. Modulární aktivní kmitočtové výhybky - laboratorní přípravek. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126070>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík.
- [3] SCHIMMEL, Jiří. Elektroakustika [online]. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací Purkyňova 118, 612 00 Brno, 2014 [cit. 2020-12-07]. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [4] Komplexní jednobrany - impedanční vlastnosti. Elektronika [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt015.htm>
- [5] Parametry reproduktorů. ReproMania.net [online]. 2008 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/parametry-reproduktoru.php>
- [6] LM4780 Overture™ Audio Power Amplifier Series Stereo 60W, Mono 120W Audio Power Amplifier with Mute [online]. 2013 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1994371.pdf>
- [7] Diotec semiconductor - GBI15A ... GBI15M, Single Phase Bridge Rectifier [online]. 2019 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/3b146c5ef04c36fa14d5eec696d46f43/gbi15a.pdf>
- [8] 41 SERIES Low profile PCB relays 8 - 12 - 16 A [online]. 2014 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2237788.pdf>
- [9] HS25-0R1F. In: HS Aluminium Housed Resistors [online]. ARCOL UK Limited [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/c285aad0d151871071d0cf452b1a9bc1/HS-10-05.45.pdf>
- [10] HS50-3R3F. In: HS Aluminium Housed Resistors [online]. ARCOL UK Limited [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/c285aad0d151871071d0cf452b1a9bc1/HS-10-05.45.pdf>
- [11] APx500 User's Manual [online]. United States of America., 2015 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <http://file.yizimg.com/531786/2018529-14373328.pdf>

- [12] LM3886 Overture™ Audio Power Amplifier Series High-Performance 68W Audio Power Amplifier w/Mute [online]. 2013 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3886.pdf>
- [13] A Cubic, Single-pole 10-A Power Relay; OMRON [online]. 2014 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/70ebc44b3d55d9a7b27221e9cb1c5c0c/G5LE.pdf>
- [14] THAT corporation - InGenius High-CMRR Balanced Input Line Receiver ICs: THAT 1200, 1203, 1206 [online]. 2017 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: [http://www.thatcorp.com/datashts/THAT\\_1200-Series\\_Datasheet.pdf](http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1200-Series_Datasheet.pdf)

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

$A$	amplituda
$\varphi$	fáze
$Y(s)$	obraz výstupní veličiny systému
$X(s)$	obraz vstupní veličiny systému
$s$	Laplaceuv operátor
$j$	imaginární jednotka
$\omega$	úhlový kmitočet
$P(\omega)$	reálná část kmitočtové charakteristiky
$Q(\omega)$	imaginární část kmitočtové charakteristiky
$Z$	absolutní impedance
$R$	činný odpor
$X$	reaktance
$A_u$	zesílení
$f_m$	mezní kmitočet
$\tau$	časová konstanta
$U_{ss}$	výstupní stejnosměrné napětí
$I_{výst}$	maximální proud dodávaný zdrojem
$k$	konstanta
$R_{tha}$	tepelný odpor chladiče
$R_{ths}$	tepelný odpor styku pouzdra s chladičem
$R_{thc}$	tepelný odpor součástky
$T_j$	maximální provozní teplota součástky udávaná výrobcem
$T_{okolí}$	teplota okolí
$P$	výkon
HP	horní propust
DP	dolní propust
Mute	ztlumení - funkce obvodu LM4780
DPS	deska plošných spojů
APx500	program ovládající přístroje řady APx

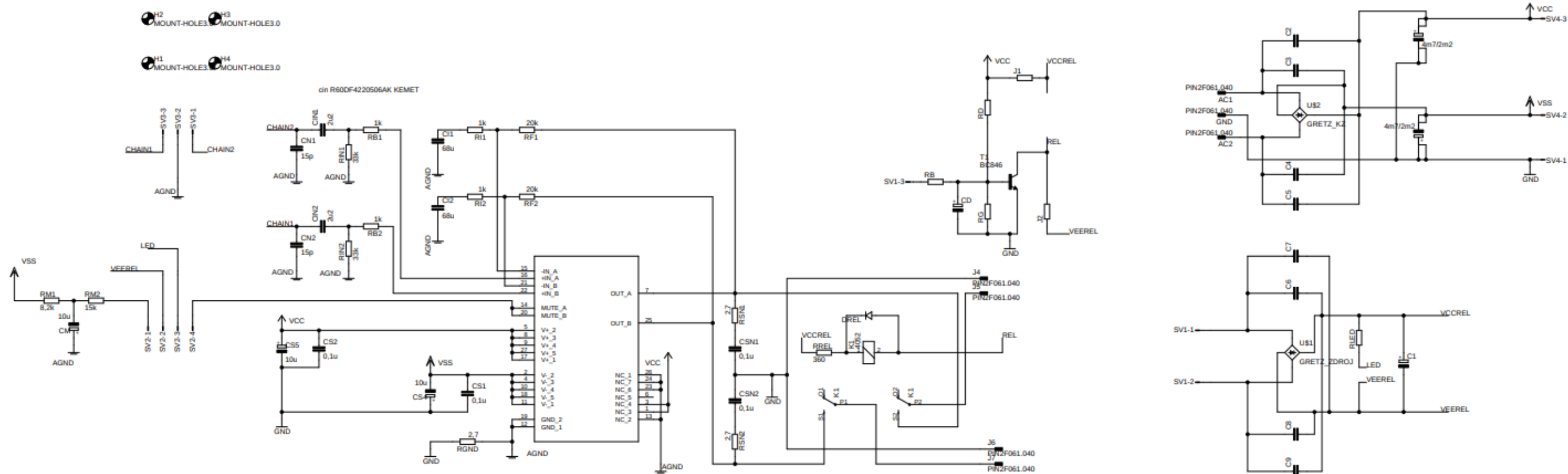


# Seznam příloh

A.	Návrh DPS.....	50
A.1.	Schéma první verze koncového zesilovače .....	50
A.2.	Navržená DPS první verze koncového zesilovače .....	51
A.3.	Schéma druhé verze koncového zesilovače.....	52
A.4.	Navržené DPS druhé verze koncového zesilovače.....	53
A.5.	Schéma změny vstupní citlivosti pro druhou verzi koncového zesilovače .....	55
A.6.	Navržené DPS změny citlivosti pro druhou verzi koncového zesilovače .....	56
B.	Vzhled přístrojových skříní.....	58
B.1.	Přístrojová skříň pro koncový zesilovač.....	58
B.2.	Přístrojová skříň pro moduly s impedancemi .....	58
C.	Vzhled reálného stavu zhotovených přípravků .....	59
C.1.	Vzhled první verze koncového zesilovače .....	59
C.2.	Vzhled modulu bočníku.....	60
C.3.	Vzhled modulu zátěže.....	60

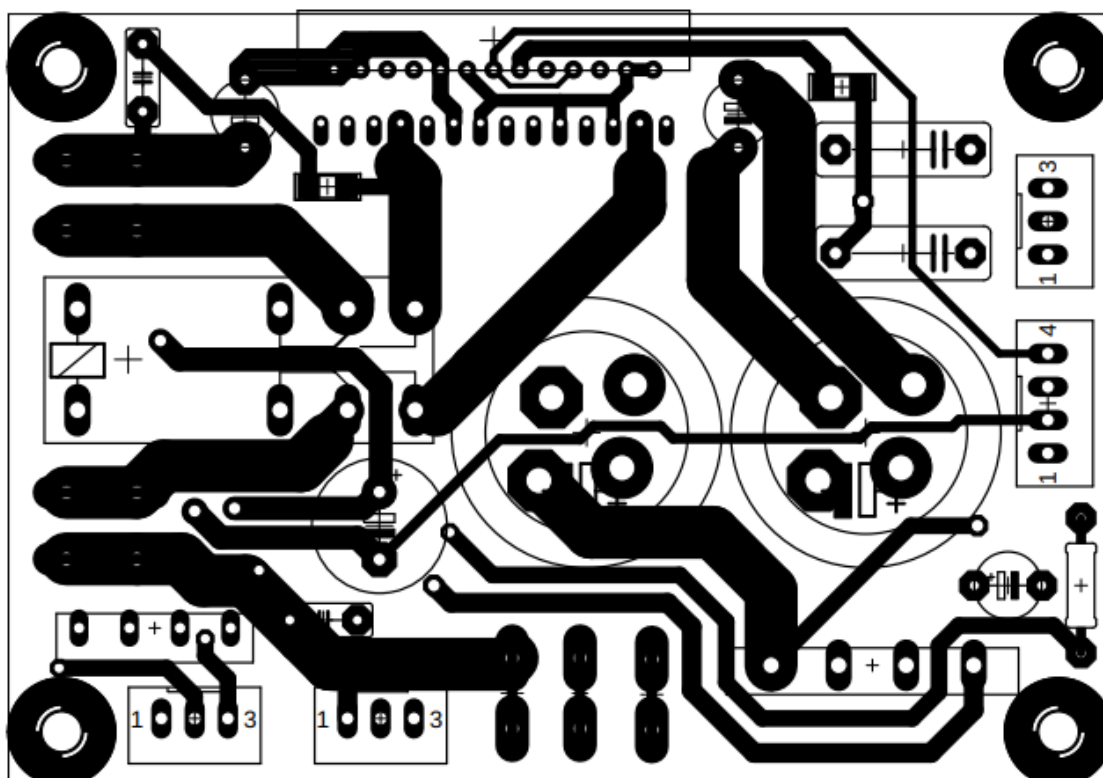
## A. Návrh DPS

### A.1. Schéma první verze koncového zesilovače

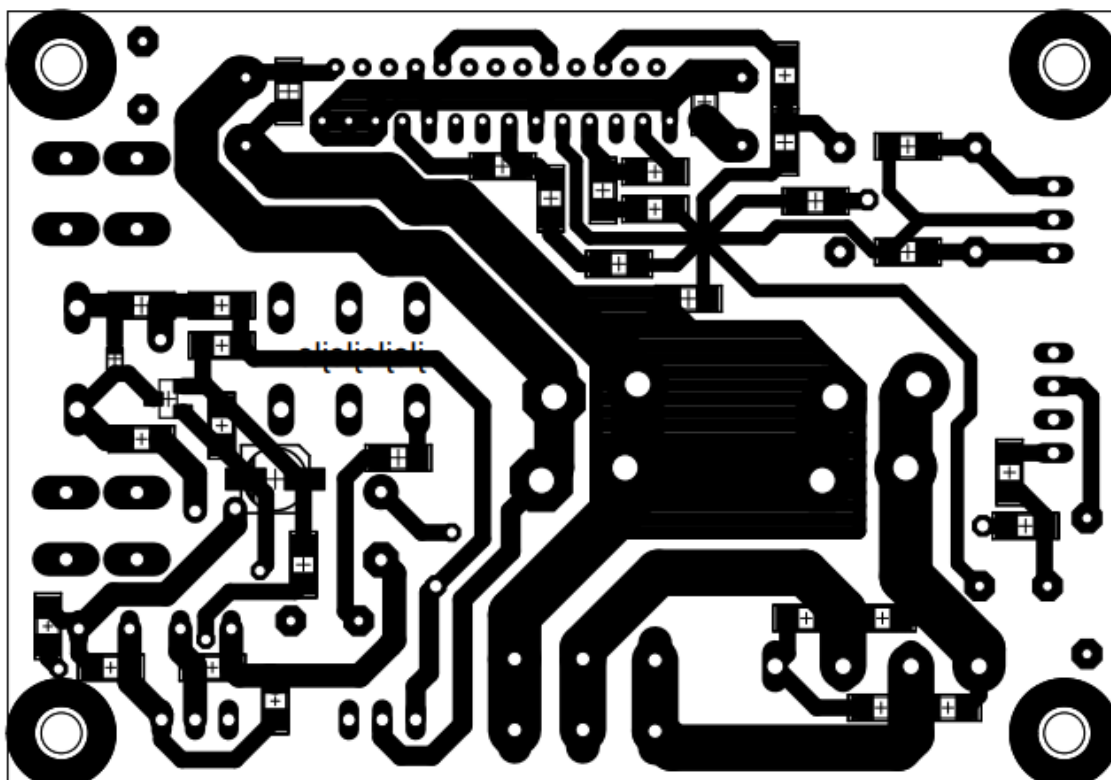


## A.2. Navržená DPS první verze koncového zesilovače

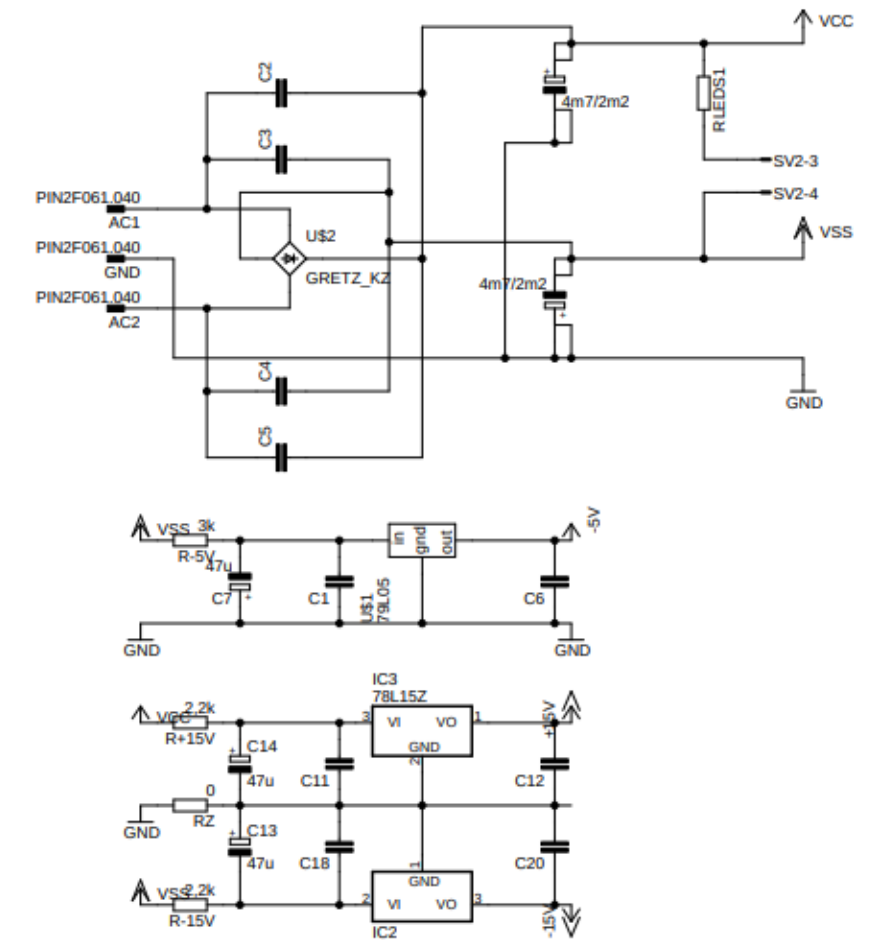
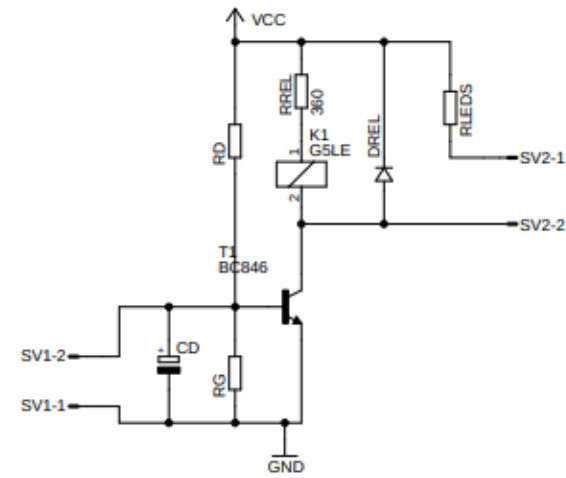
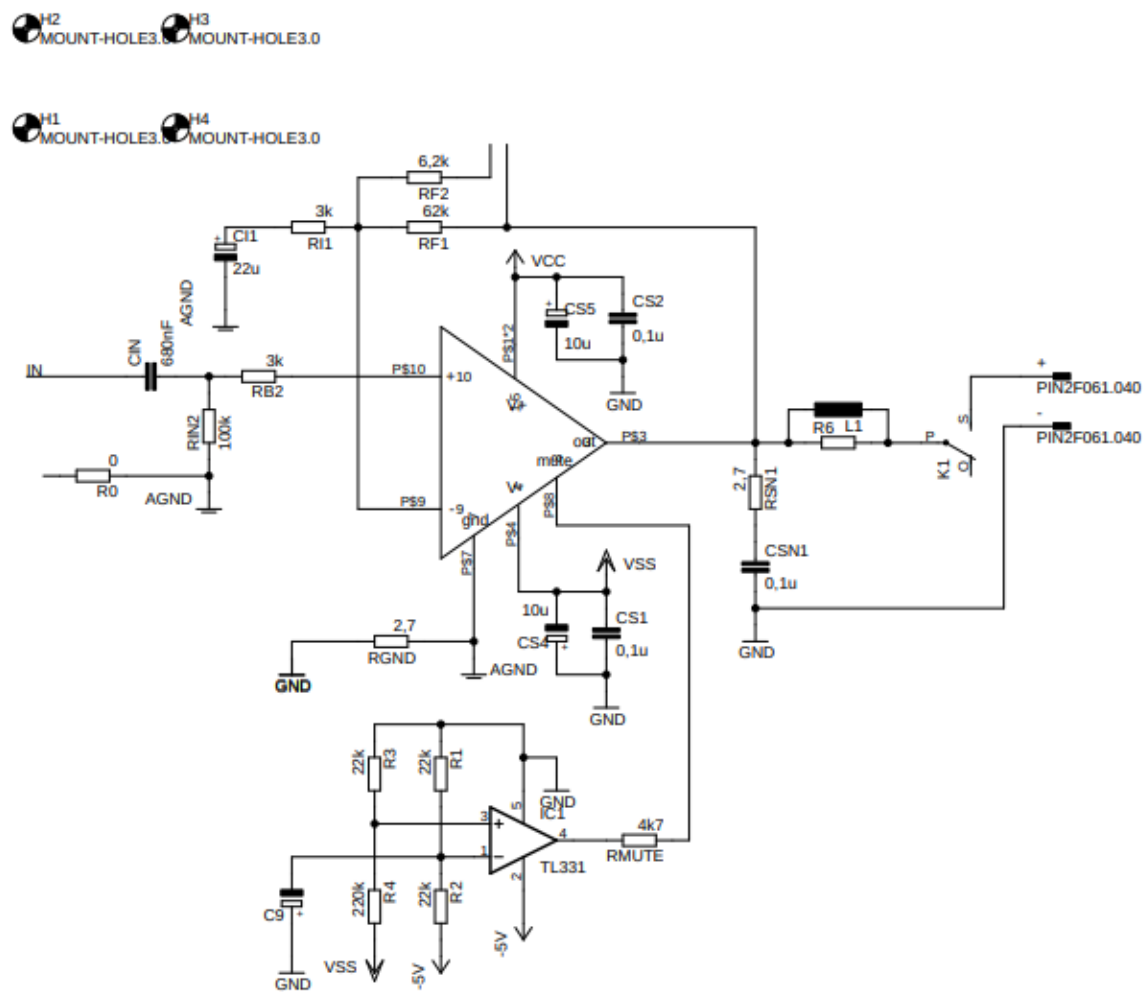
Top



Bottom

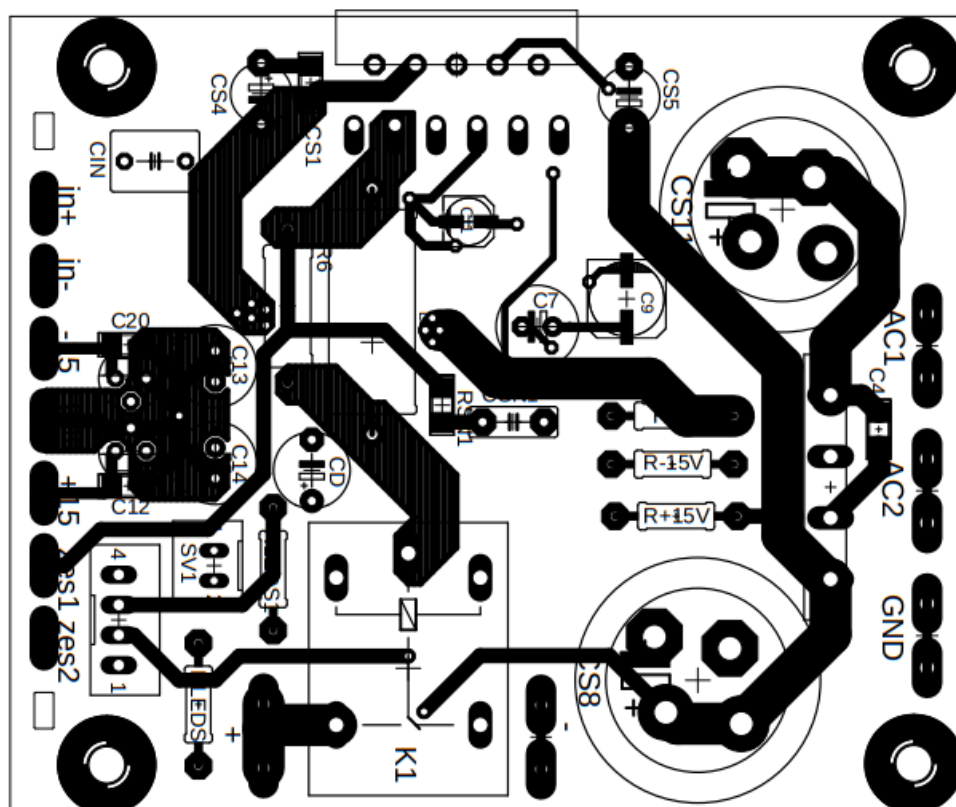


### A.3. Schéma druhé verze koncového zesilovače

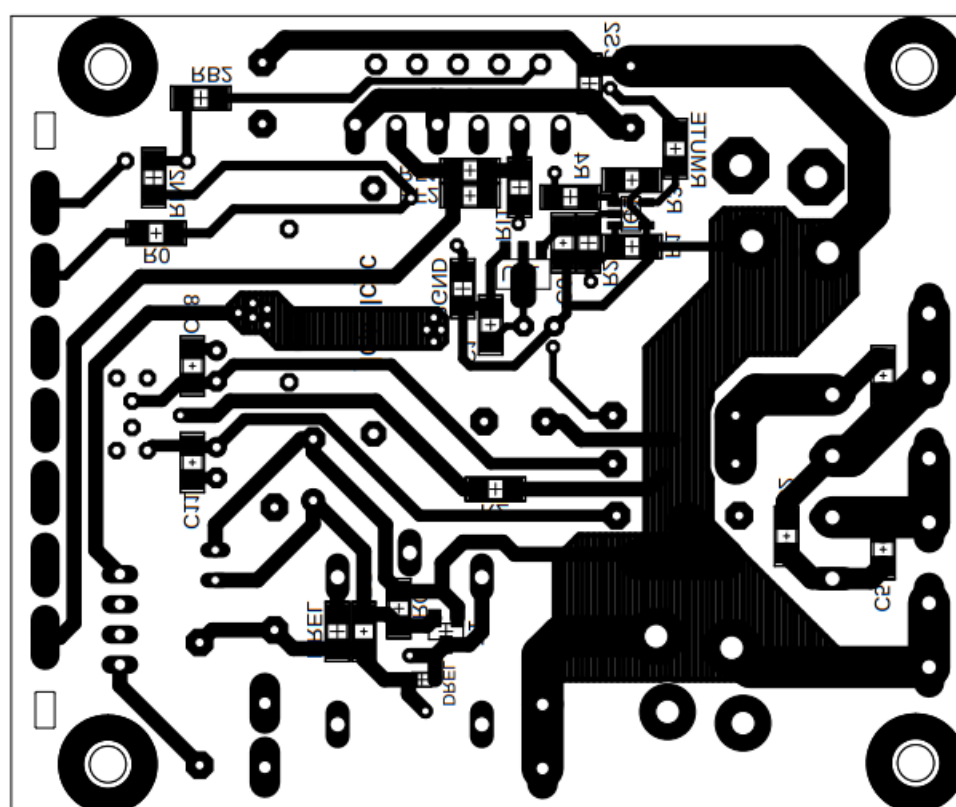


## A.4. Navržené DPS druhé verze koncového zesilovače

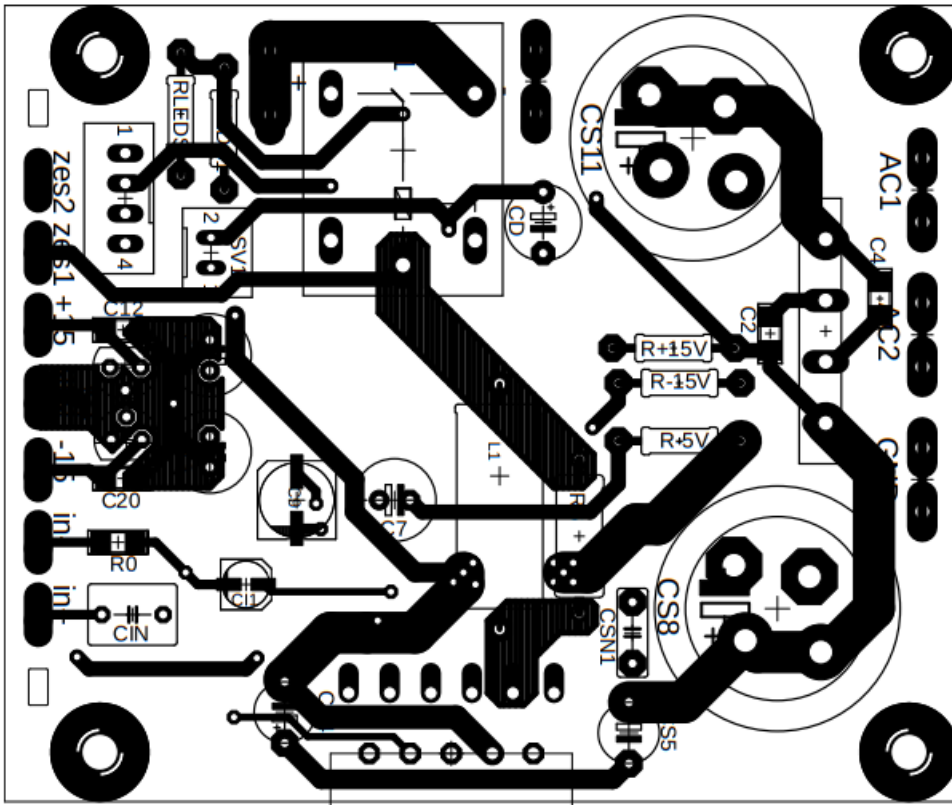
KZ1 top



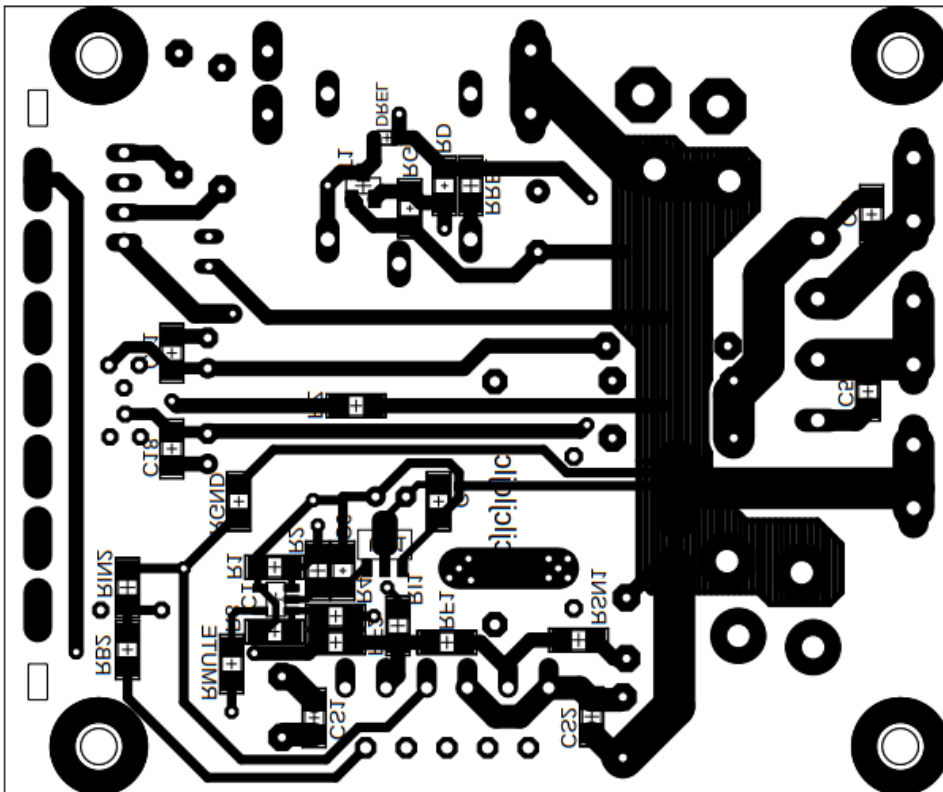
KZ1 bottom



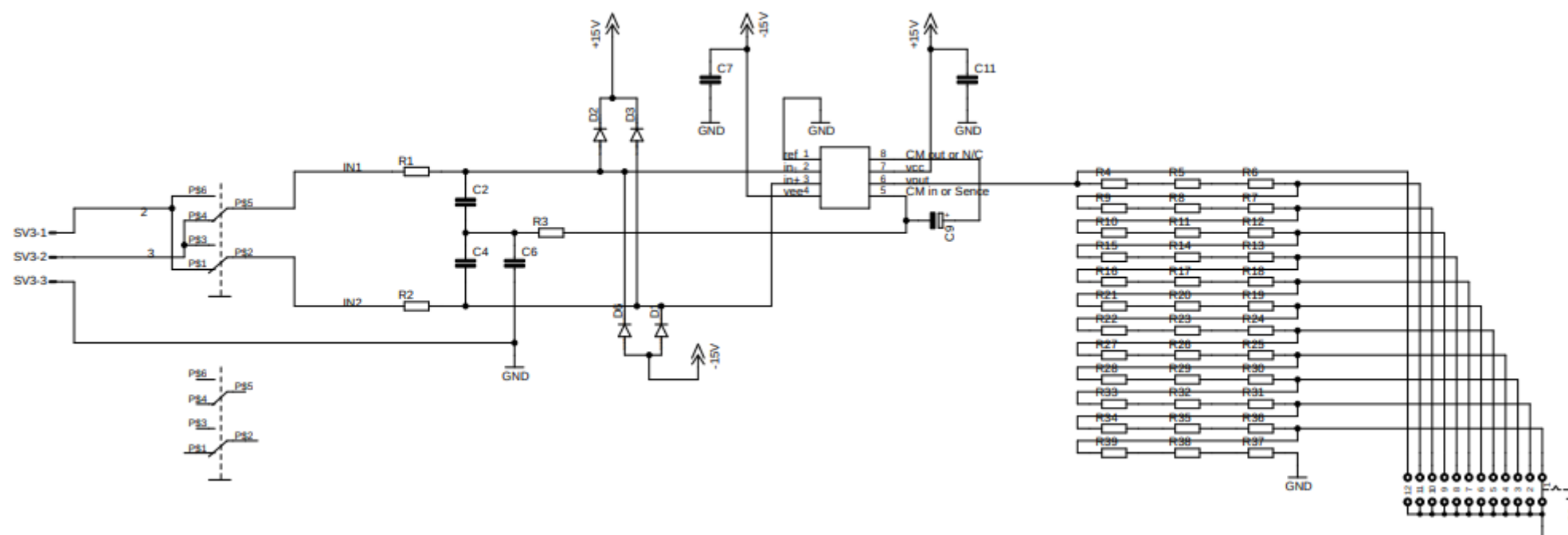
KZ2 top



KZ2 bottom

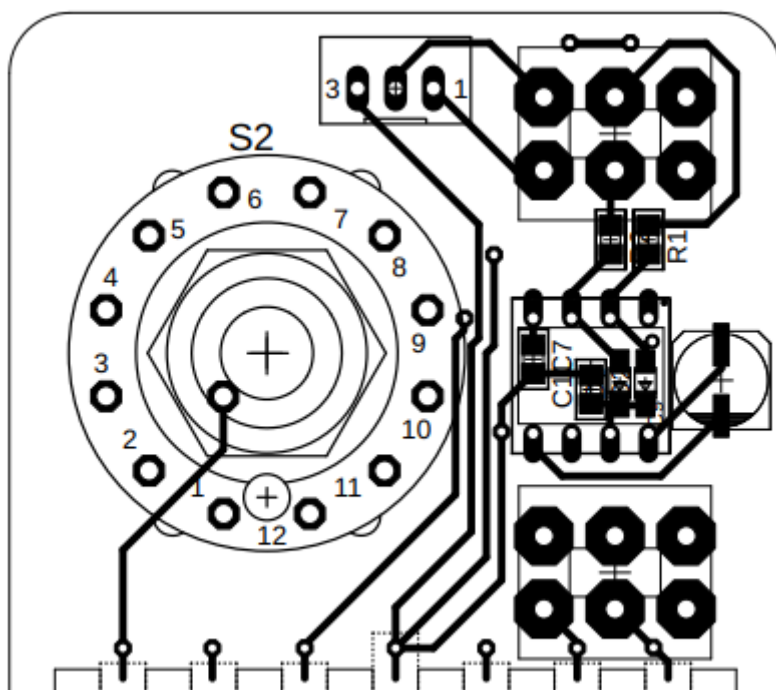


## A.5. Schéma změny vstupní citlivosti pro druhou verzi koncového zesilovače

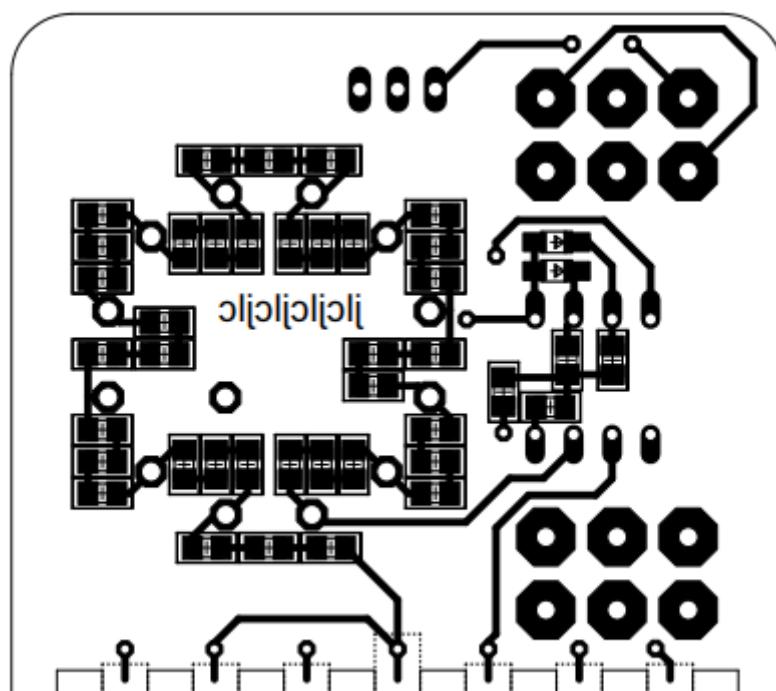


## A.6. Navržené DPS změny citlivosti pro druhou verzi koncového zesilovače

ZC1 top

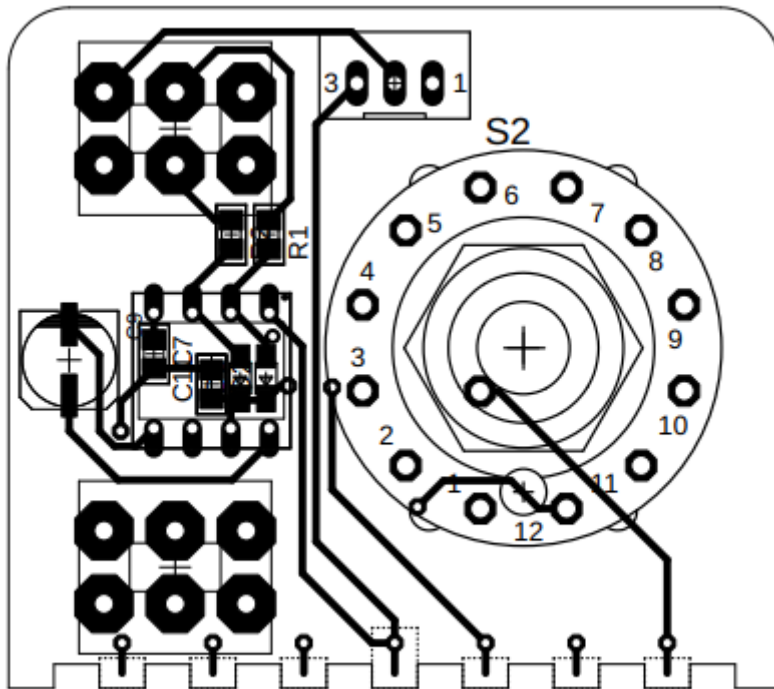


ZC1 bottom

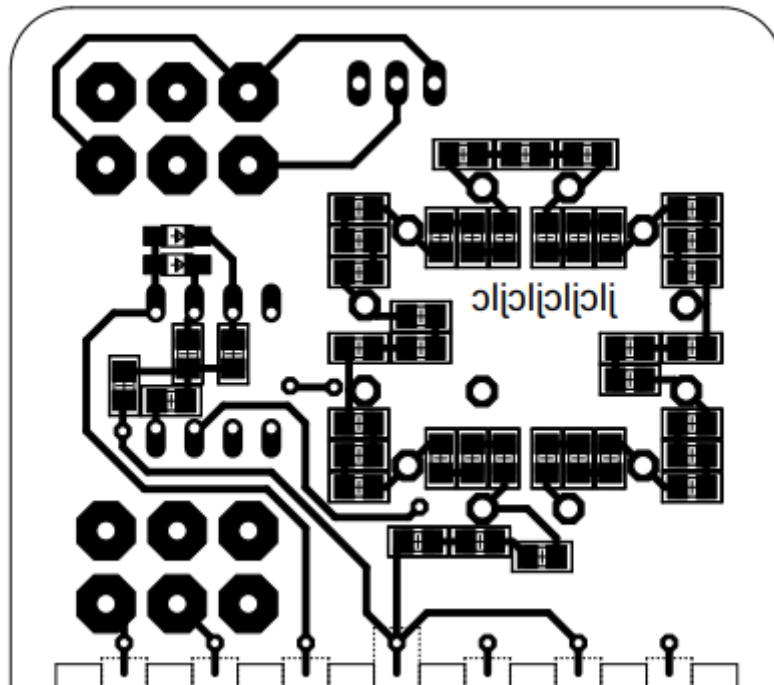




ZC2 top



ZC2 bottom



## **B. Vzhled přístrojových skříní**

### **B.1. Přístrojová skříň pro koncový zesilovač**

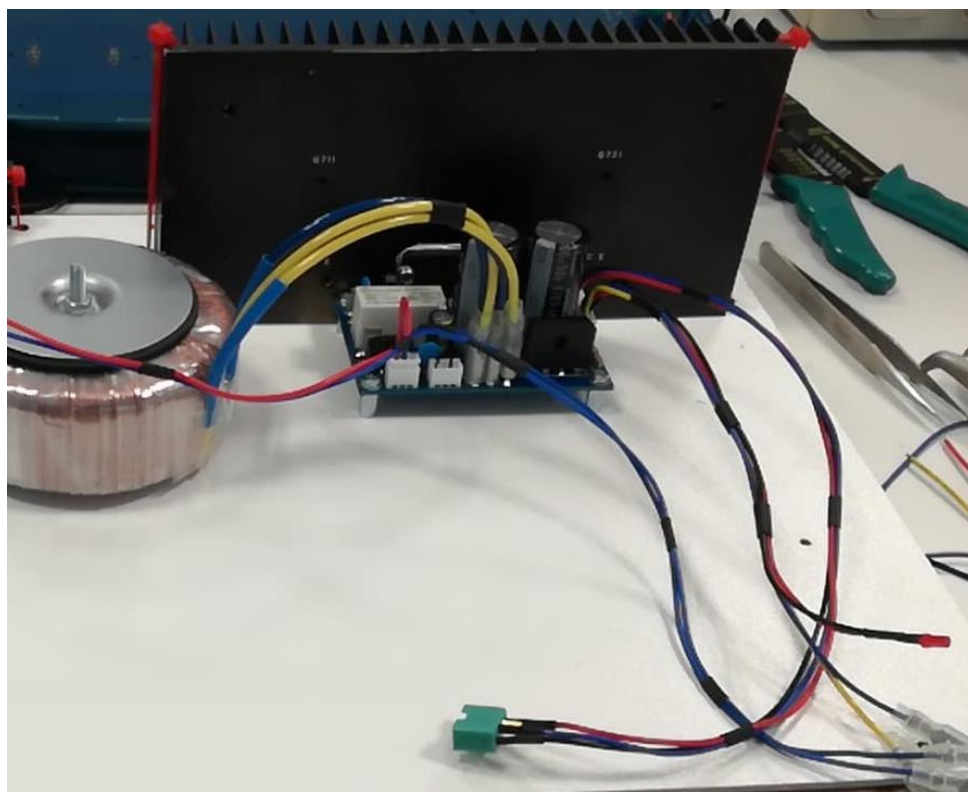
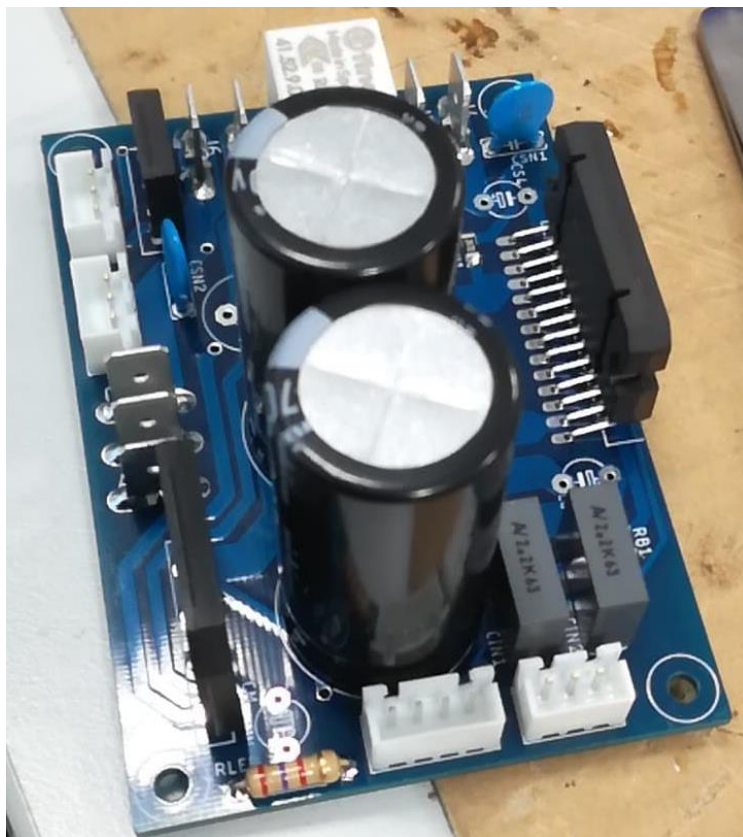


### **B.2. Přístrojová skříň pro moduly s impedancemi**



## C. Vzhled reálného stavu zhotovených přípravků

### C.1. Vzhled první verze koncového zesilovače



## C.2. Vzhled modulu bočníku



## C.3. Vzhled modulu zátěže

